

Antti Nilsson

# Elektronisten laitteiden yliaallot

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

30.3.2015

Tekijä Otsikko	Antti Nilsson Elektronisten laitteiden yliaallot
Sivumäärä Aika	55 sivua + 2 liitettä 30.3.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	Lehtori Jukka Karppinen
<p>Tässä insinöörityössä perehdyttiin yliaaltoihin ja niistä aiheutuviin haittoihin. Menetelminä olivat ilmiön teoreettisen pohjan havainnollistaminen simulointiohjelmaa käyttäen, sekä erityyppisten yksivaiheisten laitteiden ottovirran mittaaminen. Mittauksia varten rakennettiin oskilloskooppiin liitettävä mittalaite.</p> <p>Mittaustuloksista saatiin käsitys tyypillisten kodin laitteiden yliaaltopitoisuuksista. Tulokset vastasivat paljolti simuloinnin pohjalta syntynyttä ennakkokäsitystä mahdollisista yliaaltopitoisuuksista. Mitatuista laitteista suurimmat pitoisuudet mitattiin pienitehoisista LED-valonlähteistä, pienimmät hieman yllättäen LCD-televisiosta.</p> <p>Tärkeimpänä yksittäisenä havaintona yliaaltojen käyttäytyminen kytkettäessä useita yliaaltolähteitä rinnan ja tästä seurannut summutumisilmiö, joka on monimutkaisempi kuin ennalta arvioitiin. Summutumiseen näyttäisi vaikuttavan suuresti yliaaltovirtojen vaihe-erot.</p>	
Avainsanat	epälineaarinen kuorma, yliaalto, resonanssi, suodatus

Author Title	Antti Nilsson Harmonics in Electronic Devices
Number of Pages Date	55 pages + 2 appendices 30 March 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>The subject of this thesis is the phenomenon of harmonics in a power system, especially in devices containing semiconductors.</p> <p>The theoretical background of the phenomenon is demonstrated by means of circuit simulation and is backed by measurements from typical single-phase appliances. These measurements were made using a DIY instrument, the construction of which is discussed in this thesis.</p> <p>Results from the measurements of current harmonics provide a good grasp of the levels of harmonics that can be expected from these types of equipment. It can be concluded from the results that the simulations performed in this thesis correspond with reality for the most part. Of the tested appliances both the lowest and the highest levels of harmonics were measured from an appliance containing semiconductors, which was rather unexpected. The single most notable aspect of the studied phenomenon is the way harmonic currents cancel each other due to phase-angle differences.</p>	
Keywords	nonlinear load, harmonics, resonance, filtering

# Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja symbolit

1	Johdanto	1
2	Yliaaltojen synty	1
2.1	Lineaarinen ja epälineaarinen kuorma	1
2.2	Yliaallot	2
2.2.1	Virtayliaallot	3
2.2.2	Jänniteyliaallot	6
2.2.3	Yliaallon järjestysluku	10
3	Yliaalloista aiheutuvat haitat ja niiden vähentäminen	13
3.1	Lämpövaikutukset	14
3.1.1	Nollajohtimen ylikuormitus	14
3.1.2	Häviöt moottoreissa ja muuntajissa	15
3.2	Momenttivärähtelyt moottoreissa	15
3.3	Resonanssit verkossa	16
3.3.1	Sarjaresonanssi	17
3.3.2	Rinnakkaisresonanssi	20
3.3.3	Kompensointi ja resonanssiriski	21
3.3.4	Muille laitteille aiheutuvat häiriöt	25
3.4	Yliaaltopitoisuuksien vähentäminen	26
3.4.1	Induktanssin vaikutus suuntaajassa	26
3.4.2	Suuntaajan pulssiluvun nostaminen	27
3.4.3	Itsekommutoivien suuntaajien käyttäminen	28
3.4.4	Yliaaltosuodattimet	28
4	Sähkön laadulle asetetut vaatimukset	30
4.1	Yleisen jakeluverkon jännitteen laatu	30
4.2	Yliaaltovirtojen raja-arvot	32
4.2.1	Suuri sähkölaitteisto	32
4.2.2	Yksittäiset laitteet	33
4.2.3	LED-valaistus standardin näkökulmasta	34

5	Laitteiden yliaaltomittaukset	35
5.1	Mittausjärjestely	35
5.2	Syöttöjännitteen yliaaltopitoisuus	36
5.3	Mitatut laitteet ja mittauksen suoritus	37
5.3.1	Valonlähteet	38
5.3.2	Kodinkoneet	43
5.3.3	Tietokoneet	45
5.4	Yliaaltojen summautuminen	46
5.5	Valonlähteet ja IEC-standardin raja-arvot	49
5.6	Havaintoja mittauksista ja mahdollisia virhelähteitä	51
6	Yhteenveto	52
	Lähteet	54
	Liitteet	
	Liite 1. Ottovirran aaltomuotoja	
	Liite 2. IEC 61000-3-2:2014 Harmonisten virtojen raja-arvoja	

## Lyhenteet ja symbolit

$\cos \varphi$	tehokerroin järjestelmän perustaajuudella, jännitteen ja virran välisen kulman kosini.
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transform, aikatazon signaaleille tehtävä muunnos, jolla saadaan näkyviin taajuusspektri.
<i>PF</i>	Power Factor, tehokerroin. Voi tarkoittaa kokonaistehokerrointa tai perustaajuista tehokerrointa, riippuen yhteydestä.
<i>RMS</i>	Root Mean Square, signaalin tehollisarvo.
<i>THD</i>	Total Harmonic Distortion, kokonaissärö [%].
<i>THDI_15</i>	särö laskettuna parittomista yliaaltotaajuuksista järjestyslukuun 15 asti [%].
<i>THDI_39</i>	särö laskettuna parittomista yliaaltotaajuuksista järjestyslukuun 39 asti [%].
<i>VAC</i>	vaihtojännite [V].
<i>VDC</i>	tasajännite [V].

## 1 Johdanto

Nykyaikaisista sähkölaitteista suuri osa sisältää elektroniikkaa muodossa tai toisessa. Käyttäjälle tästä on monia hyötyjä, kuten parantunut energiatehokkuus ja pienlaitteissa alentunut paino sekä pienentynyt koko. Elektroniset laitteet ovat kuitenkin sähköverkon kannalta epäedullisempia kuin vanhat, perinteistä tekniikkaa sisältävät kojeet. Sähkönjakeluverkko on perusteiltaan sitä samaa perinteistä tekniikkaa, minkä johdosta uuden ja vanhan yhdistämisessä voi ajoittain olla haasteita.

Insinööriyössä tutkittiin tyypillisten kodin laitteiden ottamaa virtaa ja sen aaltomuotoa. Etenkin nopeasti yleistyvät LED-valaisimet ovat sähkön laadun ja häiriöpäästöjen osalta hieman kyseenalaisia, eivätkä päästömääräykset koske monia pienitehoisia laitteita. Kodin laitteiden yliaaltopitoisuuksia tutkittiin omavalmisteisella mittalaitteella. Saatuja mittaustuloksia tarkastellaan standardin määrittämien rajojen suhteen ja tutkitaan, esiintyykö ylityksiä.

Erilaiset simulointiohjelmat ovat tärkeä apuväline suunnittelutyössä useilla aloilla. Monessa tapauksessa mallinnettavat ilmiöt ovat niin monimutkaisia, ettei laskutoimitusten tekeminen käsin ole käytännöllistä. Sähkötekniikassa simulointia käytetään piiritasolta aina kokonaisten järjestelmien toiminnan mallintamiseen asti. Simuloinnista on hyötyä myös suunnitteluvaiheen jälkeen järjestelmien toimintaa kuvattaessa. Piirisimulointiohjelmaa käytetään tässä työssä erilaisten kytkentöjen ja niistä aiheutuvien tyypillisten yliaaltojen syntymekanismien havainnollistamiseen.

## 2 Yliaaltojen synty

### 2.1 Lineaarinen ja epälineaarinen kuorma

Kuorman epälineaarisuudella tarkoitetaan kuormittavan laitteen tai yksittäisen komponentin ominaisuutta, joka aiheuttaa sen ottaman virran aaltomuodon poikkeamisen syöttöjännitteen aaltomuodosta. Täysin lineaarisella kuormalla virran aaltomuoto on täsmälleen sama kuin syöttöjännitteen.

Lineaarisia komponentteja syöttöjännitteen suhteen ovat esimerkiksi vastukset, ilmasydämiset kelat ja kondensaattorit. Komponentin reaktiivisuus itsessään ei tee siitä epälineaarista jännitteen suhteen. Reaktanssin aiheuttama vaihesiirto ei myöskään vaikuta lineaarisuuteen.

Tyypillisin epälineaarinen kuorma on puolijohteita sisältävä elektroninen laite. Puolijohdet, kuten diodit ja transistorit, ovat voimakkaasti epälineaarisia. Tämä johtuu niiden kyvystä siirtyä johtamattomasta tilasta johtavaan tilaan hyvin nopeasti. Tämä mahdollistaa komponentin läpi kulkevan virran nopeat muutokset.

Muitakin epälineaarisia kuormia on, kuten esimerkiksi muuntajat ja moottorit. Näiden epälineaarisuus johtuu niissä olennaisena osana olevan magneettipiirin ominaisuuksista. Magneettipiirillä on kaksi ominaisuutta, jotka vaikuttavat lineaarisuuteen: kyllästyminen eli saturaatio ja hystereesi.

Näistä ilmiöistä johtuvat yliaaltopitoisuudet ovat normaalitilanteessa niin pienet, että niistä aiheutuva haitta on minimaalinen. Sen vuoksi tässä työssä ei keskitytä niihin sen enempää, vaikka itsessään ilmiöiden ymmärtäminen onkin oleellisen tärkeää.

## 2.2 Yliaallot

Yliaalloiksi kutsutaan järjestelmässä esiintyviä perustaajuuden monikertoja. Yliaalto - sanan ohella käytetään termiä *harmoninen* (engl. *harmonic*). Yliaallon järjestysluku kertoo, mikä monikerta perustaajuudesta se on. Näin esimerkiksi 50 Hz:n järjestelmässä 3. yliaalto löytyy taajuudelta 150 Hz, 5. yliaalto 250 Hz:n kohdalta jne. Tämä voidaan ilmaista myös täsmällisemmin näin:

$$f_n = n * f_0 \quad (1)$$

$f_n$  on  $n$ :nen yliaallon taajuus [Hz]

$n$  on yliaallon järjestysluku

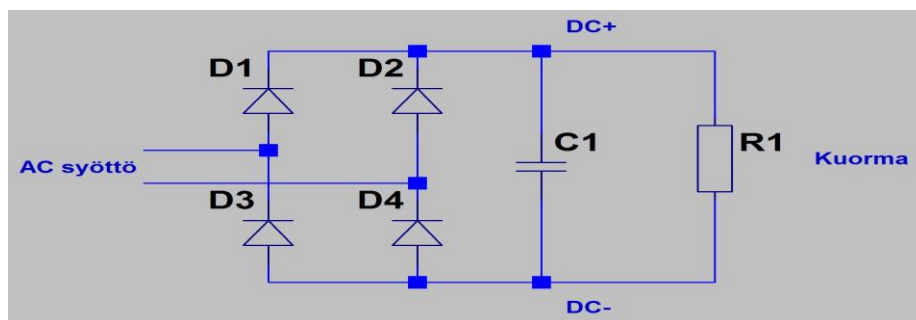
$f_0$  on perustaajuus [Hz]



Yhtälössä 1 (ks. ed. s.) kerroin  $n$  on kokonaisluku. Tällä tavoin syntyviä yliaaltoja kutsutaan harmonisiksi yliaalloiksi. Jos kerroin ei ole kokonaisluku, kyseessä on epäharmoninen yliaalto. Näitäkin esiintyy, mutta hyvin pienessä mittakaavassa. Tämän johdosta tässä työssä keskitytään harmonisiin yliaaltoihin.

### 2.2.1 Virtayliaallot

Virtayliaalto syntyy kuorman ottaessa verkosta epäsinimuotoista virtaa. Laitteen rakenteesta ja sisäisestä kytkennästä riippuu, millainen virran aaltomuoto on. Otetaan esimerkiksi yksinkertainen tasasuuntauskytkentä, jollaisia käytetään hyvin yleisesti elektronisissa laitteissa:



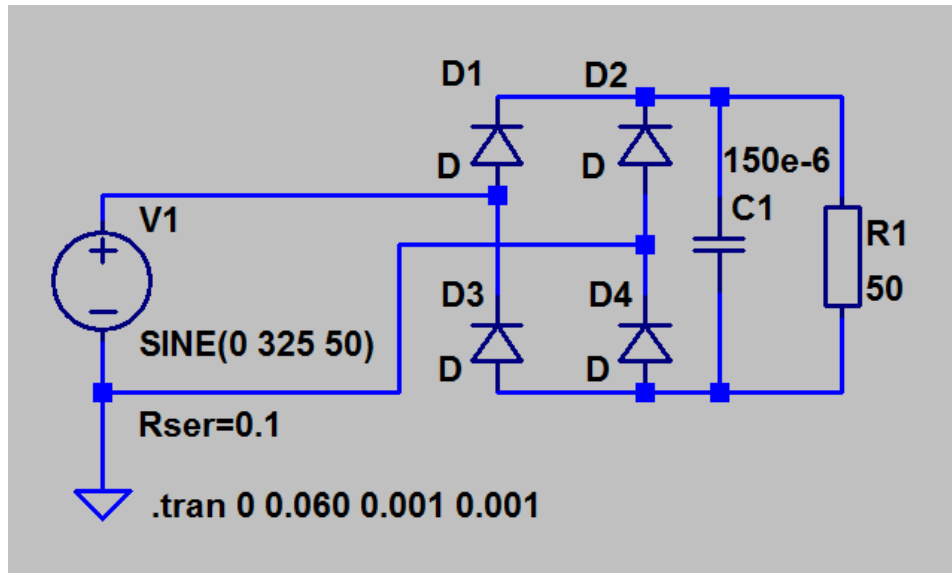
Kuva 1. Kokoaaltotasasuuntaus laitteessa, yksinkertaistettu kytkentä.

Kuvassa 1 oleva kytkentä ei vastaa todellista laitetta, mutta asian havainnollistamiseksi tehdään yksinkertaistuksia. Kytkennässä epälineaarisia komponentteja ovat diodit D1...D4. Puolijohdekomponenttina diodi on johtamattomassa tilassa, kunnes sen yli oleva myötäsuuntainen jännite ylittää diodille ominaisen kynnysjännitteen. Tämä riippuu diodin tyypistä, mutta on tyypillisesti 0,7 V yksittäiselle komponentille, noin 1 V pienelle tasasuuntaussillalle. [1; 2, s. 221.]

Kytkennässä oleva kondensaattori C1 toimii energiavarastona, jolla tasoitetaan tasasuuntaussillalta tulevaa pulssimaista tasajännitettä. Vastuksen R1 tilalla on oikeassa laitteessa lisää komponentteja, joilla jännitettä käsitellään edelleen.

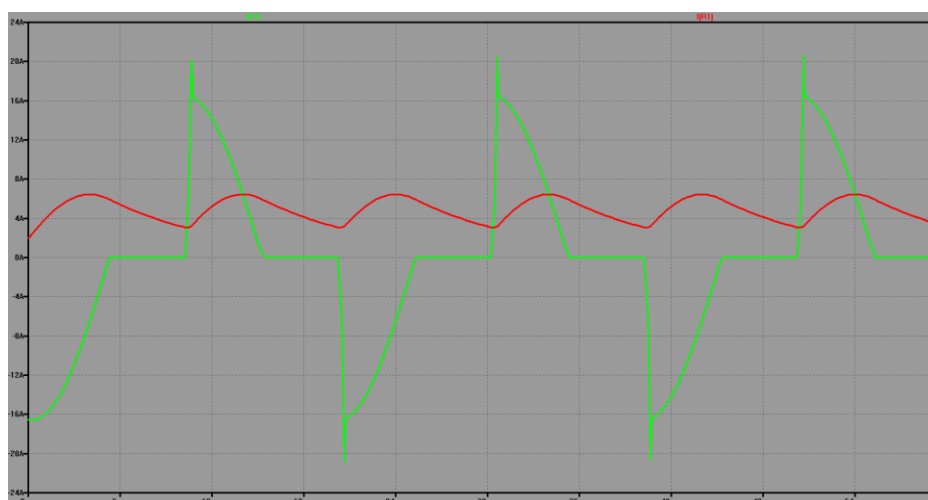
Esiintyviä virtoja voidaan helposti havainnollistaa piirianalyysiohjelman simulointitoiminnoilla. Tässä työssä käytetään Linear Technologyn LTspice IV -ohjelmaa, mutta

monista muistakin löytyy vastaavat toiminnot. Oleellista on, että ohjelma osaa tehdä aikatazon signaaleille FFT-muunnoksen, jotta nähdään taajuusspektri. Simuloinnissa käytetään seuraavaa kytkentää:



Kuva 2. Simuloinnissa käytetty kytkentä, kokoaaltotasasuuntaus.

Kytkenässä jännitelähde V1 kuvaa syöttävää verkkoa, jossa jännite on 230 VAC RMS ja taajuus 50 Hz. Komponenttiarvot eivät edusta mitään todellista laitetta, vaan ne on valittu havainnollistamisen helpottamiseksi. Vastus R1 kuvaa tasasuuntaajalla syötettyä kuormitusta. Tarkastellaan kytkennän verkosta ottamaa virtaa seuraavasti:

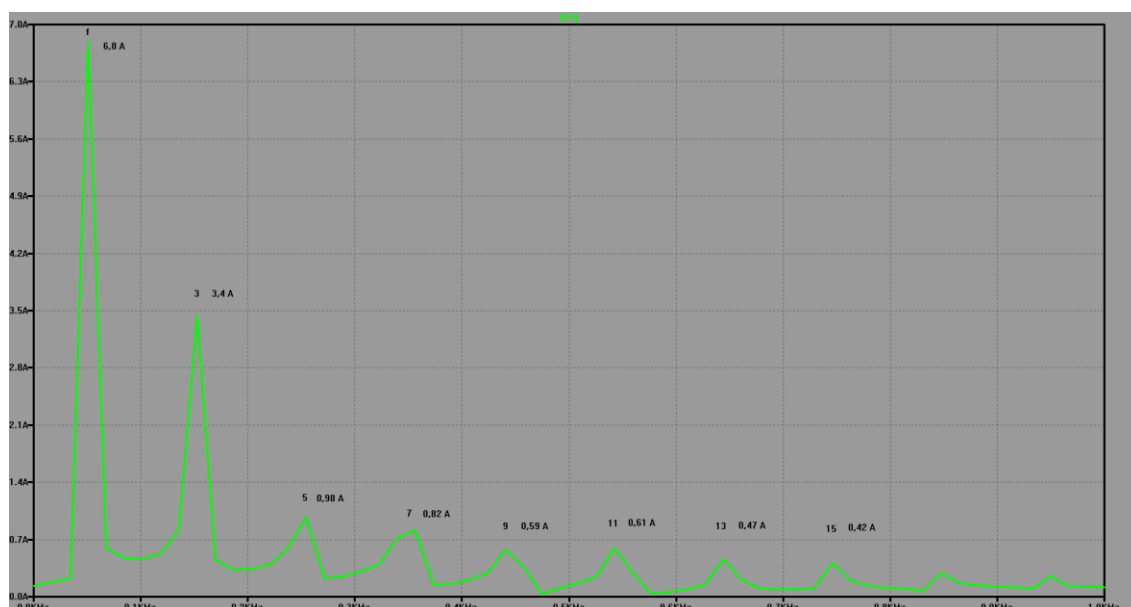


Kuva 3. Simuloidun tasasuuntauskytkennän ottovirta ja kuorman virta.

Kuvassa 3 (ks. ed. s.) verkosta otettu virta vihreällä ja kuormaan menevä virta punaisella. Kuten voidaan huomata, ottovirta ei muistuta lainkaan siniaaltoja. Virtaa liikkuu lyhyinä pulsseina, joiden kesto on noin 5 ms.

Ottovirran huippuarvo on noin 20 A, kun kuormaan menevän sykkivän tasavirran huippuarvo on vain 6,5 A. Tässä näkyy selvästi kondensaattorin vaikutus, sillä ilman sitä myös tasavirta kävisi hetkellisesti nollassa. Huomionarvoista on myös sykkivän tasavirran taajuus, joka on kaksi kertaa ottovirtaa suurempi.

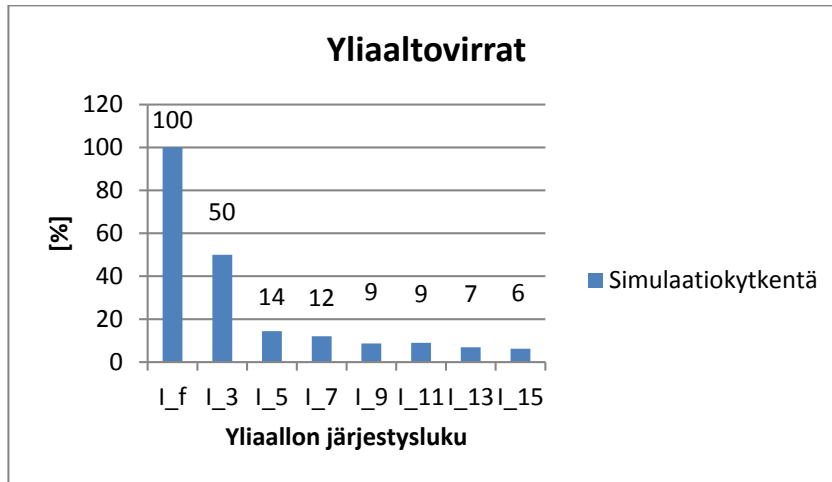
Simulointiohjelmiston FFT-muunnostoiminnolla voidaan tarkastella signaaleja taajuustasossa. Kyseessä on matemaattinen toimenpide, jonka syvällisempi tarkastelu jätetään tämän aiheen ulkopuolelle. Todettakoon, että kyseinen toiminto löytyy lähes kaikista oskilloskoopeista ja monista muista mittalaitteista. Kuvassa 3 esitetty ottovirta näyttää taajuustasossa seuraavalta:



Kuva 4. Simuloidun ottovirran spektri.

Kuvaajassa x-akselilla on nyt ajan sijasta taajuus. Kuvassa on taajuuskaista 0...1 kHz. On selvästi nähtävissä useita säännöllisin välein toistuvia piikkejä. Ensimmäinen piikki on taajuudella 50 Hz, toinen 150 Hz:n kohdalla ja loput siitä 100 Hz:n välein. Eli perustaajuus 50 Hz kerrottuna parittomalla kokonaisluvulla.

Voidaan siis tulkita kytkennän tuottavan parittomia yliaaltoja. Tilannetta voidaan selkiyttää kokoamalla tulokset pylväsdiagrammiksi siten, että perustaajuinen virta edustaa sataa prosenttia ja muut suhteutetaan siihen. Näin virtojen itseisarvoilla ei ole merkitystä ja voidaan helpommin suorittaa vertailua:



Kuva 5. Simuloidun virran yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Kuvassa 5  $I_f$  on siis perustaajuinen virta (*engl. fundamental*) ja muut järjestysluvun mukaan yliaaltoon 15 asti. Huomataan, että kolmatta yliaaltoa esiintyy huomattavassa määrin. Näyttäisi myös siltä, että järjestysluvun kasvaessa osuus pienenee.

### 2.2.2 Jänniteyliaallot

Vaikka yliaallot syntyvät kuormituksen ottamasta virrasta, niistä aiheutuva sähkönladullinen haitta näkyy jännitteessä. Tämä on aluksi hieman epäloogista, sillä eihän kuormitusvirta kulje kuin kyseiseen laitteeseen. Miten se siis voisi muualla vaikuttaa?

Tilannetta pitääkin ajatella pidemmälle sähkön syöttösuuntaan. Ajatellaan esimerkiksi pientalon sähköjärjestelmää. Pääkeskukselta ylöspäin verkossa tulee vastaan kaapeleita, jakokaappeja, sulakkeita ja muita laitteita. Ennen pitkää tullaan syöttävälle muuntajalle.

Selitys ilmiölle piileekin juuri muuntajassa, tarkemmin sanottuna sen impedanssissa. Kuten tiedetään, virran kulkiessa impedanssin läpi, sen yli muodostuu jännite. Täsmällisemmin ilmaistuna:

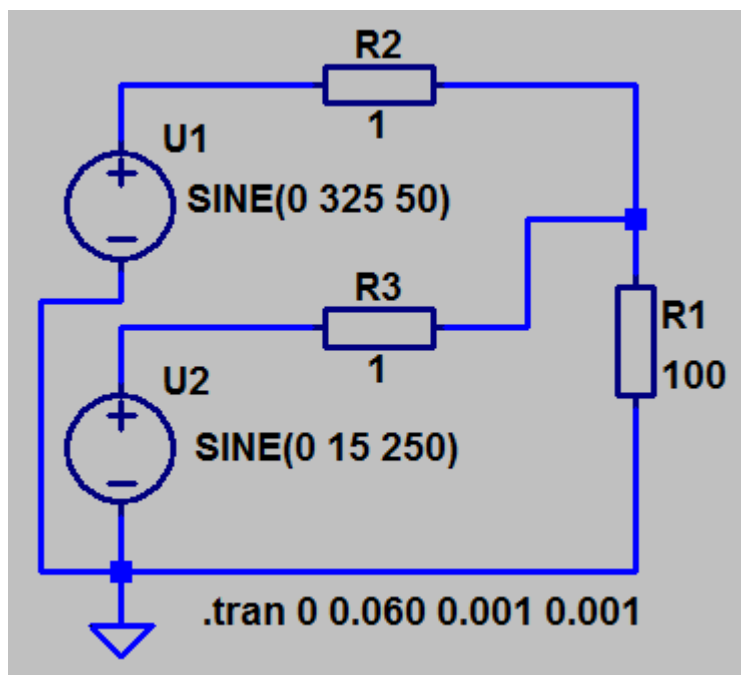
$$U = I * Z \quad (2)$$

$U$  on muodostunut jännite [V]

$I$  on virta [A]

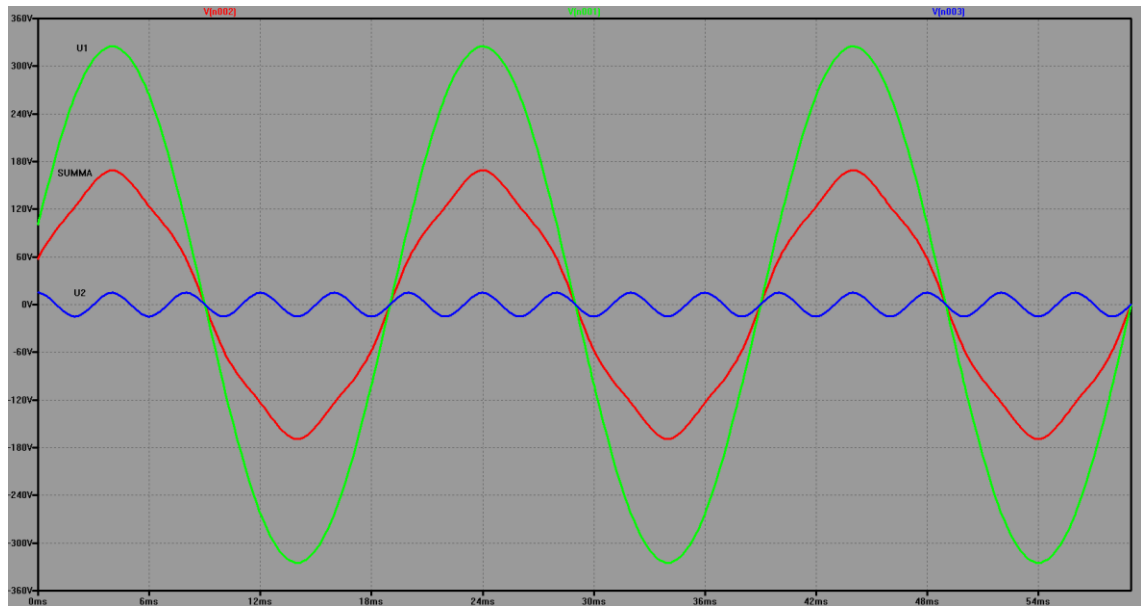
$Z$  on impedanssi [ $\Omega$ ]

Yliaaltovirran synnyttämä jännite on luonnollisesti samantaajuinen kuin virtakin. Yliaaltojännitteet summautuvat perustaajuuteen aiheuttaen jännitteen aaltomuodon vääristymistä. Tarkastellaan tilannetta esimerkin avulla:



Kuva 6. Simulaatiokytkentä, jännitteiden summautuminen.

Kuvassa 6 jännitelähde U1 syöttää 230 VAC 50 Hz RMS ja U2 10,6 VAC 250 Hz RMS jännitettä. Jännitteet summautuvat vastuksessa R1. Jännitteiden aaltomuodot näyttävät seuraavilta:

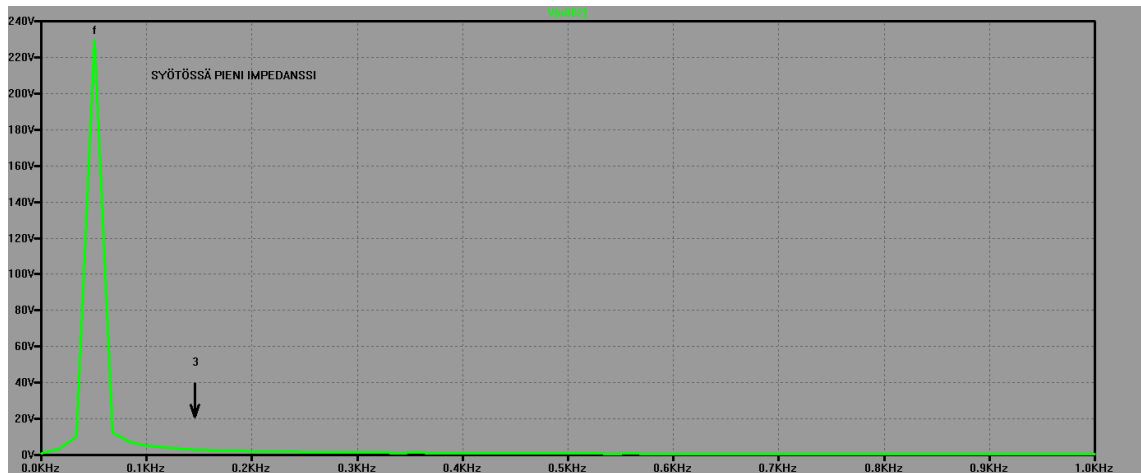


Kuva 7. Jännitteiden summautuminen simulaatiokytkenässä.

Kuvassa 7 vihreällä 50 Hz:n lähde, sinisellä 250 Hz:n lähde ja punaisella niiden summa. Summajännitteessä näkyy selvästi kulmikkuutta puhtaaseen 50 Hz:n siniaaltoon nähden. Näin selkeästi jännite harvoin vääristyy todellisessa verkossa, jossa muuntajan impedanssi on pienempi ja yliaallon suhteellinen osuus myös pienempi.

Esimerkeissä on syöttävää verkkoa kuvattu jännitelähteillä, joilla on pelkästään sisäistä resistanssia. Todellisuudessa muuntajassa ja verkossa on huomattava määrä reaktanssia, jonka takia yliaallot käyttäytyvät erilailla, kuin edellä on esitetty. Tästä huolimatta ilmiötä voidaan näin yksinkertaistaen kuvata.

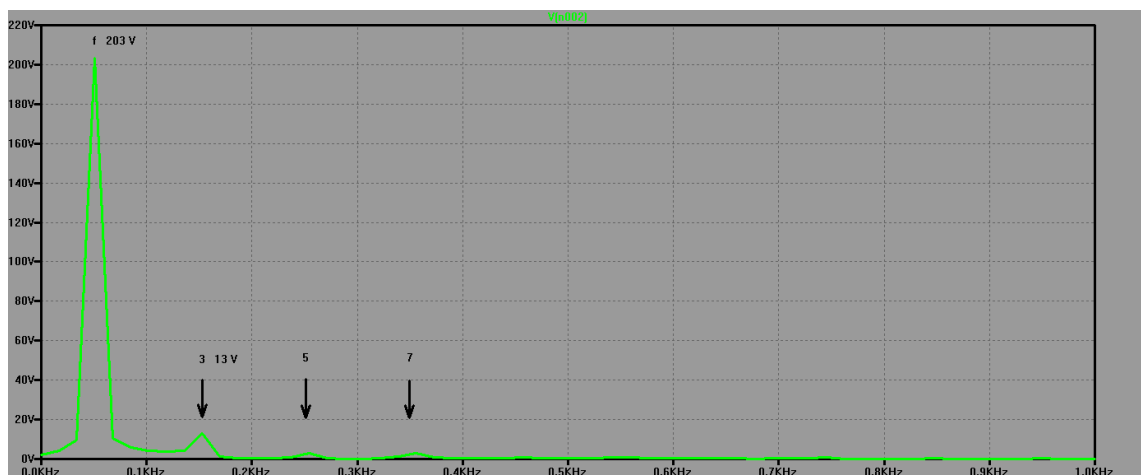
Luvussa 2.2.1 käsiteltiin virtayliaaltojen syntymistä tasasuuntauskytkennässä. Havaittiin, että niitä syntyy ja niiden spektri voitiin saada FFT-muunnoksella näkyviin. Käytetään samaa kytkentää esimerkkinä ja katsotaan, miltä näyttää syöttävän verkon jännite:



Kuva 8. Syöttöjännitteen spektri, pieni impedanssi.

Kuten kuvasta 8 voitiin nähdä, perustaajuuden lisäksi ei juuri muuta ole havaittavissa. Tämä on tilanne, kun syöttävässä verkossa (muuntajassa) on pieni impedanssi. Tässä on käytetty arvoa  $0,1 \Omega$ . Kuvassa näkyvä nuoli on taajuuskaistassa 150 Hz:n kohdalla, jossa tiedetään esiintyvän yliaaltovirtaa. Ei siis ole havaittavissa yliaaltovirroista johtuvaa jännitteen vääristymistä.

Jos syötön impedanssia kasvatetaan huomattavasti, tilanne alkaa muuttua. Muutetaan impedanssiksi  $5 \Omega$  ja katsotaan mitä tapahtuu:



Kuva 9. Syöttöjännitteen spektri, suuri impedanssi.

Impedanssin kasvattaminen 50-kertaiseksi toi esiin yliaaltovirtojen vaikutukset. 3. jänniteyliaalto (1. nuoli) näkyy jo selvästi, 5. ja 7. alkavat erottua myös (2. ja 3. nuoli). Voidaan panna merkkeille, että 3. yliaalto on jo noin 6 % perustaajuudesta.

### 2.2.3 Yliaallon järjestysluku

Simuloimalla suuntaajakytkentää havaittiin sen tuottavan parittomia yliaaltoja, etenkin kolmatta yliaaltoa. Havaituilla yliaaltotaajuuksilla ja suuntaajan rakenteella on seuraava yhteys:

$$n = k * p \pm 1 \quad (3)$$

*n on yliaallon järjestysluku*

*k on kokonaisluku*

*p on suuntaajan pulssiluku*

Tässä suuntaajan pulssiluvulla tarkoitetaan verkosta otettujen virtapulssien määrää yhden verkkotaajuuden jakson aikana. Tai tarkemmin, monta jännitepulssia DC-välipiiriin saapuu. Näin esimerkiksi yksivaiheinen tasasuuntauskytkentä, jollaista simuloitiin luvussa 2.2.1, ottaa verkosta 2 virtapulssia yhden jakson aikana. Yhtälön 3 nojalla voidaan siis päätellä yliaallon järjestysluku:

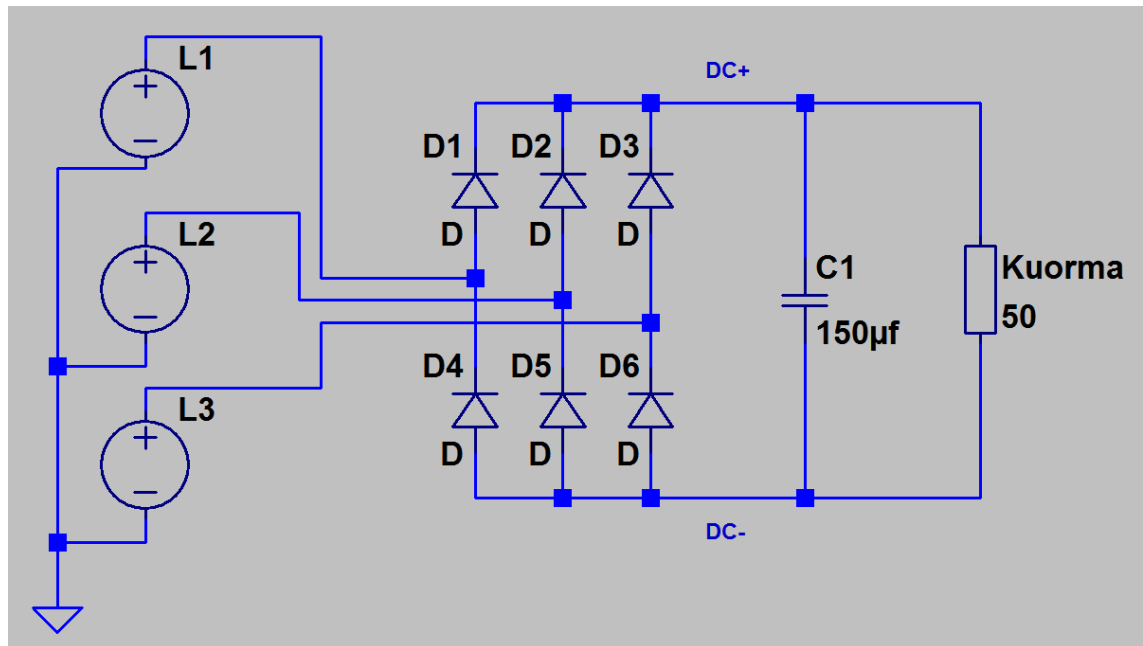
$$n = k * 2 \pm 1 \rightarrow n = 1, 3, 5 \dots$$

Perustaajuuden lisäksi näyttäisi esiintyvän parittomia yliaaltoja. Tämä on simulointitulosten kanssa linjassa. Jos taas kyse olisi kolmivaiheisesta suuntaajasta, jollaisia suurempitehoiset laitteet ovat, olisivat yliaallot järjestysluvultaan erilaisia:

$$n = k * 6 \pm 1 \rightarrow n = 5, 7, 11, 13, 17, 19 \dots$$

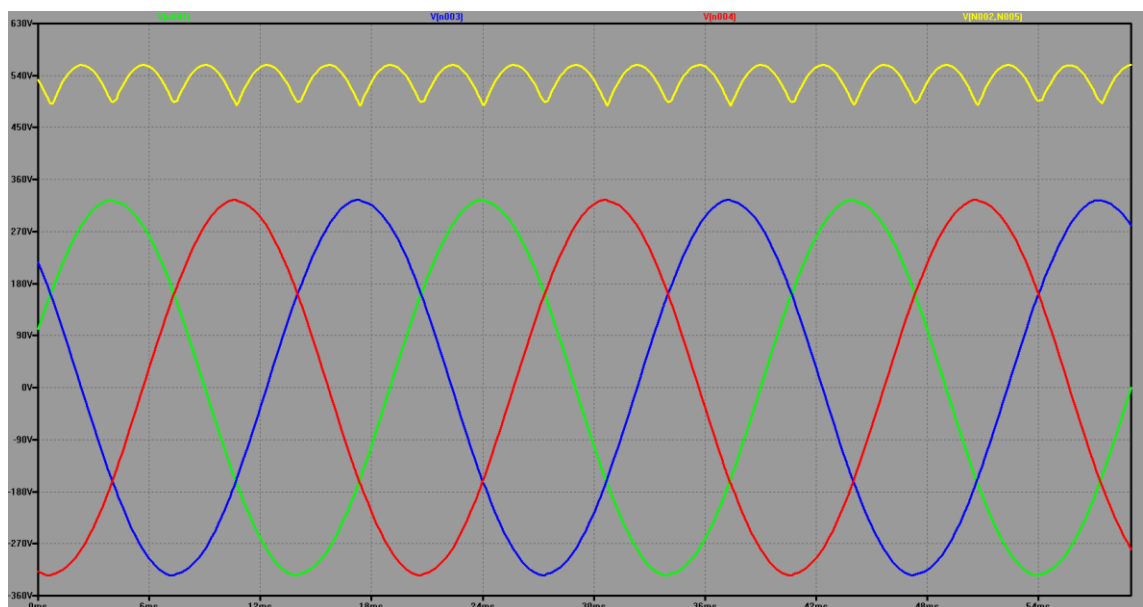
Suuntaajan pulssiluku 6 selittyy kolmivaiheisella kytkennällä, joka koostuu kuudesta puolijohdekomponentista. Laite on kytkennältään seuraavanlainen:





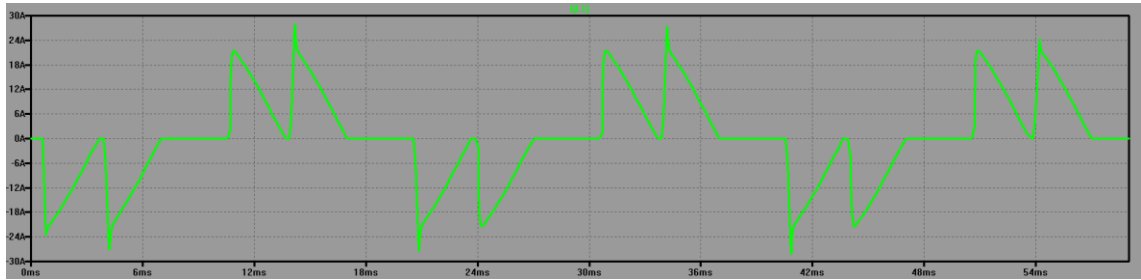
Kuva 10. Kolmivaiheinen tasasuuntauskytkentä.

Yksivaiheiseen kokoaaltotasasuuntaukseen verrattuna tarvitaan siis kaksi diodia lisää. Jännitelähteet L1...L3 kuvaavat kolmivaihesyöttöä siten, että vaihekulmat ovat L1  $0^\circ$ , L2  $120^\circ$  ja L3  $-120^\circ$ . Katsotaan, miltä jännitteet kytkennässä näyttävät:



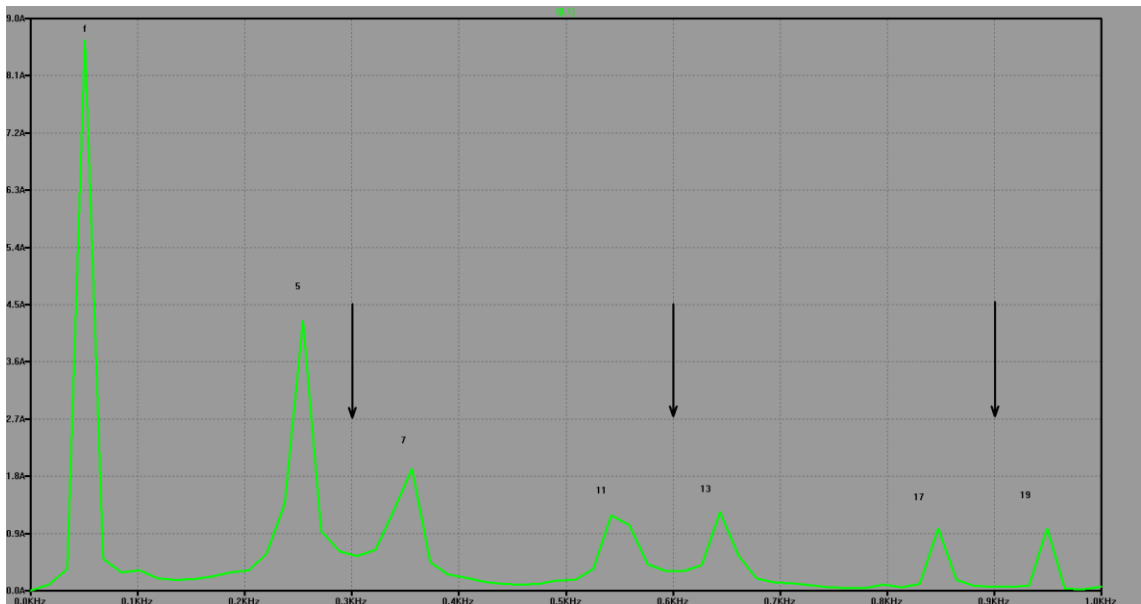
Kuva 11. Kolmivaihetasasuuntaus, jännitteet syötössä ja DC-välipiirissä.

Kuvassa 11 (ks. ed. s.) keltaisella DC-jännite ja alempana kolmivaihesyöttö. Tässä esimerkissä DC-jännitteessä on epärealistisen paljon aaltoisuutta havainnollistamisen helpottamiseksi. Tämä aiheutuu liian pienestä välipiirin kapasitanssista C1 kuormaan nähden. Syöttöjännitteen huippuarvo on 325 VAC ja DC-välipiirissä noin 560 VDC. Tämä selittyy sillä, että suuntaussilta on kytketty pääjännitteeseen 400 VAC RMS. Tästä laskemalla huippuarvoksi tulee  $400\text{ V} * \sqrt{2} \approx 565\text{ V}$ , johon kondensaattori C1 varautuu. Tarkastellaan seuraavaksi kytkennän ottamaa virtaa vaiheesta L1:



Kuva 12. Kolmivaihesuuntaaja, ottovirta ilman induktanssia.

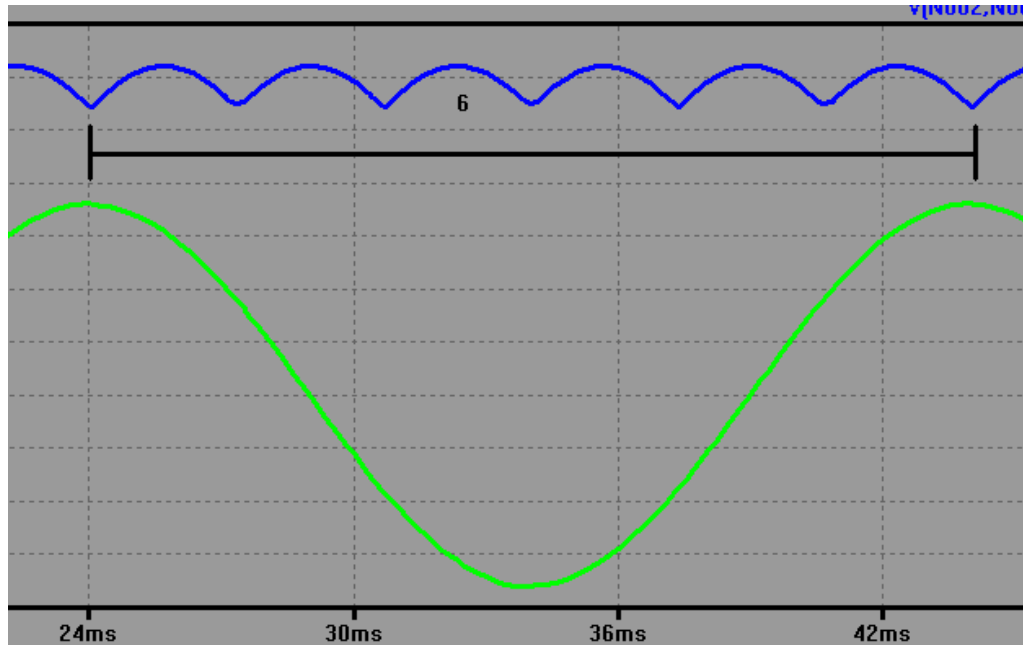
Kuvassa 12 näkyy selvästi kaksisakaraisia pulsseja. Ottovirran FFT-muunnos on tämmännäköinen:



Kuva 13. Kolmivaihesuuntaaja, ottovirran spektri.

Spektrissä on selvästi näkyvissä 3 yliaaltoparia. Taajuudet ovat 250 Hz ja 350 Hz, 550 Hz ja 650 Hz sekä 850 Hz ja 950 Hz. Havaitaan siis yliaallot 5, 7, 11, 13, 17 ja 19. Yh-

tälön 3 avulla voidaan päätellä kyseessä olevan 6-pulssinen suuntaaja. Sama voitaisiin päätellä mittaamalla DC-välipiirin jännitteen taajuus ja vertaamalla sitä syöttötaajuuteen:



Kuva 14. Kolmivaihesuuntaaja, syöttöjännite ja DC-jännite.

Yhden syöttöjännitteen jakson aikana DC-piirissä havaitaan 6 pulssia. Tämän tyyppinen tasasuuntaaja on hyvin yleinen yksinkertaisuutensa vuoksi. Jos yliaaltoitoisuksia halutaan pienentää, voidaan käyttää 12-, tai jopa 24-pulssisia suuntaajia. Nämä ratkaisut tulevat kuitenkin huomattavasti kalliimmiksi niiden vaatimien lisäkomponenttien vuoksi. [3.]

### 3 Yliaalloista aiheutuvat haitat ja niiden vähentäminen

Yliaallot ovat ylimääräistä kuormitusta kaikkialla sähköverkossa, minne pääsevät leviämään. Vaikutukset näkyvät normaalia suurempana lämpenemisenä, häiriöinä muille laitteille tai jopa vaarallisina resonanssi-ilmiöinä. Usein on myös niin, ettei yliaaltojen haittavaikutuksia ole osattu tai voitu ottaa huomioon verkkoja mitoitettaessa.

### 3.1 Lämpövaikutukset

#### 3.1.1 Nollajohtimen ylikuormitus

Selkeimmin havaittava yliaaltovirroista johtuva lämpeneminen on nollajohdon ylikuormittuminen. Tämä johtuu yliaaltovirtojen erilaisesta käyttäytymisestä perustaajuiseen virtaan nähden.

Nollajohtimellisessa kolmivaihejärjestelmässä ei nollajohdossa kulje perustaajuisia virtaa, kun vaihejohtimien kuormitus on tasainen. Jos näin ei ole, nollajohdossa alkaa kulkea kuormituksen epäsymmetrinen osuus. Tätä tilannetta kutsutaan vinokuormaksi. Vinokuorma on täysin normaalia, vaikka aina pyritään tasaamaan kuorma mahdollisimman hyvin.

Ongelma on siinä, että yliaaltovirroista niin kutsutut *kolmannet harmoniset* (engl. *triplen harmonics*) eivät kumoa toisiaan, vaan summautuvat. Näitä ovat parittomat kolmella jaolliset yliaallot, eli järjestysluvut 3, 9, 15, jne. Tämän takia kolmas yliaalto on niin hankala tapaus: sitä synnyttäviä yksivaiheisia laitteita on paljon ja kaikki kasvattavat nollajohdon kuormitusta.

Pienjännitejakelujärjestelmissä nollajohtimen poikkipinnan on oltava vaihejohtimien suuruinen aina  $16 \text{ mm}^2 \text{ Cu} / 25 \text{ mm}^2 \text{ Al}$  poikkipintaan asti, jos voidaan olettaa yliaaltopitoisuuksien pysyvän suhteellisen pieninä. [4, s. 17.]

Jos tiedetään, että kohteessa tulee esiintymään huomattavia määriä kolmansia yliaaltoja, joudutaan nollajohtimen poikkipintaa kasvattamaan. Nykyään tämä osataan ennakoida laskelmin ja kokemuksen avulla, mutta vanhoissa asennuksissa voi tulla merkittäviä ongelmia. Tämä on ymmärrettävää, sillä yliaaltoja aiheuttavia laitteita on ollut kotitalouskäytössä vasta verrattain lyhyen aikaa.

Vaarallisen tilanteesta tekee se, että nollajohdossa ei ole ylikuormitussuojausta. Nollavirtaa ei myöskään tavallisesti mitata kuten vaihevirtoja, joten siihen ei kiinnitetä huomiota ennen kuin jotain tapahtuu. Nollajohdossa voi kuitenkin esiintyä kolmatta yliaalltoa jopa 1,7 -kertainen määrä vaihevirtaan nähden. [5.]

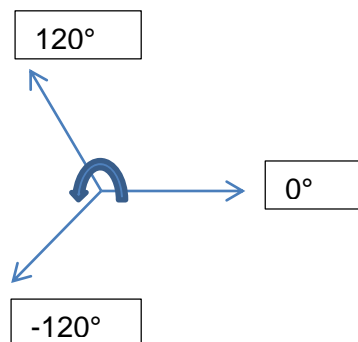
### 3.1.2 Häviöt moottoreissa ja muuntajissa

Sähkökoneissa syntyvät häviöt voidaan jakaa virtalämpö-, rauta- ja mekaanisiin häviöihin. Virtalämpöhäviöt syntyvät käämitysten resistansseissa, niitä kutsutaan myös  $I^2R$ -häviöiksi (teho). Näistä yliaallot vaikuttavat voimakkaimmin muuntajien sydänraudassa syntyviin pyörrevirta- ja hystereesihäviöihin.

Sydänraudan pyörrevirtahäviöt (*engl. eddy current losses*) lisääntyvät vielä taajuuden neliössä, kun hystereesihäviöt kasvavat lineaarisesti taajuuden noustessa. Käämitysten  $I^2R$ -häviöt lisääntyvät nimensä mukaisesti kuormitusvirran neliössä. Yliaallot siis vaikuttavat negatiivisesti sähkökoneiden muuten varsin hyvään hyötysuhteeseen. [6.]

### 3.2 Momenttivärähtelyt moottoreissa

Ylimääräisen lämpenemisen lisäksi yliaalloista on muutakin haittaa moottoreille. Kolmivaihemoottorin toiminta perustuu pyörivän magneettikentän luomiseen käämitysten avulla. Tämä kenttä pyörii syöttötaajuuden määräämällä kulmanopeudella ja vaihejärjestyksen määräämään suuntaan. Kentän pyörimistä voidaan havainnollistaa vaiheosoittimilla:



Kuva 15. Vaiheosoittimet.

Kuvassa 15 positiivinen suunta on vastapäivään, kuten yksikköympyrässä. Osoittimet voivat kuvata jännitteitä tai virtoja, yleensä niin, että vaihe L1:n vaihekulma on  $0^\circ$  ja muita verrataan siihen. Perustaajuudella tilanne on yksinkertainen, mutta monimutkaistuu otettaessa mukaan yliaallot. Tarkastellaan yliaaltoja taulukkomuodossa:

Taulukko 1. Yliaaltojen sekvenssit. [7, s. 5, mukaillen.]

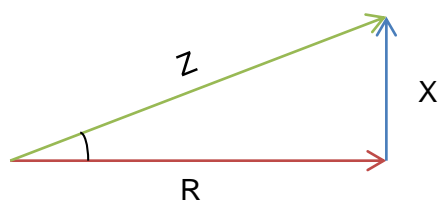
Yliaalto	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Sekvenssi	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Sekvenssillä tarkoitetaan kyseisen yliaallon pyörimissuuntaa perustajaajuuteen nähden. Plusmerkkiset pyörivät samaan suuntaan ja miinusmerkkiset vastakkaiseen suuntaan. Nollasekvenssin yliaallot eivät pyöri. Taulukossa 1 huomionarvoista on viidennen yliaallon sekvenssi, sillä niitä esiintyy verrattain paljon.

Moottorien kannalta tämä tarkoittaa sitä, että vastakkaiseen suuntaan pyörivät yliaallot tuottavat jarruttavaa momenttia. Eri suuntiin pyörivien kenttien yhteisvaikutuksesta syntyy myös oskilloivaa vääntöväärähtelyä moottorin akselille. Jos huono tuuri käy, tämä väärähtely voi saada aikaan mekaanisen resonanssin koneen muiden osien kanssa.

### 3.3 Resonanssit verkossa

Suurin yliaalloista aiheutuva haitta on riski resonanssitilanteen syntymiseen sähköverkossa. Sähköisellä resonanssilla tarkoitetaan tilannetta, jossa verkon induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi on yhtä suuri. Näin ollen ne kumoavat toisensa ja verkon impedanssiksi tulee pelkkä resistanssi, joka voi olla hyvinkin pieni. Tilannetta on helppo hahmottaa impedanssikulmion avulla:



Kuva 16. Impedanssikolmio.

Jos kolmiosta poistetaan reaktanssi  $X$ , tai kumotaan vastakkaismerkkisellä vektorilla (alaspäin), impedanssi  $Z = R$ . Kyseisillä arvoilla ei kummoista resonanssia pääse syntymään, sillä resistanssia on niin paljon. Resonanssin syntyminen vaatiikin verkolta pienen resistanssin.

Piirin resonanssitaajuus voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (4)$$

$f$  on värähtelytaajuus [Hz]

$L$  on induktanssi [H]

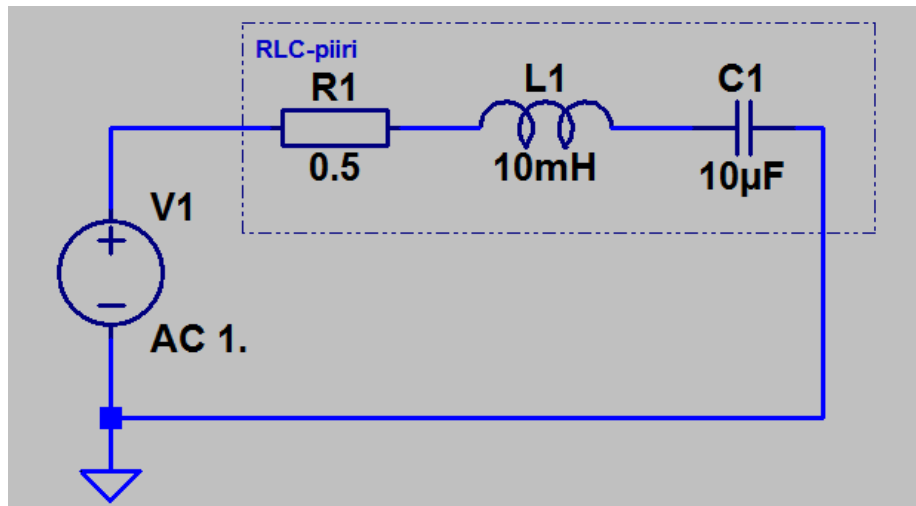
$C$  on kapasitanssi [F]

Resonanssissa energiaa liikkuu reaktanssien välillä, induktiivisen reaktanssin magneetikentän ja kapasitiivisen reaktanssin sähkökentän välillä. Tätä värähtelyä vaimentaa ainoastaan piirissä oleva resistanssi.

Resonanssi voi syntyä pienessä mittakaavassa esimerkiksi yksittäisen laitteen sisällä, tai suuremmassa mittakaavassa kahden verkon komponentin välillä. Resonanssi-ilmiötä käytetään myös hyödyksi monin tavoin suodatuspiirejä suunniteltaessa.

### 3.3.1 Sarjaresonanssi

Sarjaresonanssissa induktanssi ja kapasitanssi ovat nimensä mukaisesti sarjassa. Hahmotellaan tällainen kytkentä:

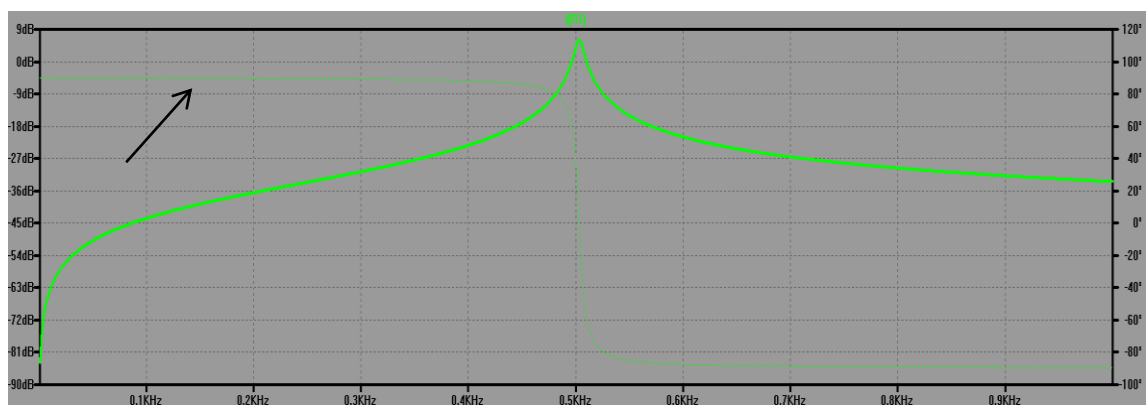


Kuva 17. Simulaatiokytkentä, sarjaresonanssi.

Kuvan 17 mukaisessa piirissä resonanssitaajuus olisi yhtälön 4 nojalla:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 * 10^{-3} H * 10 * 10^{-6} F}} \approx 503,3 Hz$$

Tällä taajuudella induktanssi L1 ja kapasitanssi C1 kumoavat toisensa ja piirissä kulkeva virta saavuttaa huippunsa. Tarkistetaan tämä oletus simuloimalla taajuuspyyhkäisy alueella 1...1 000 Hz:



Kuva 18. RLC-sarjapiiri, virta taajuuden funktiona.

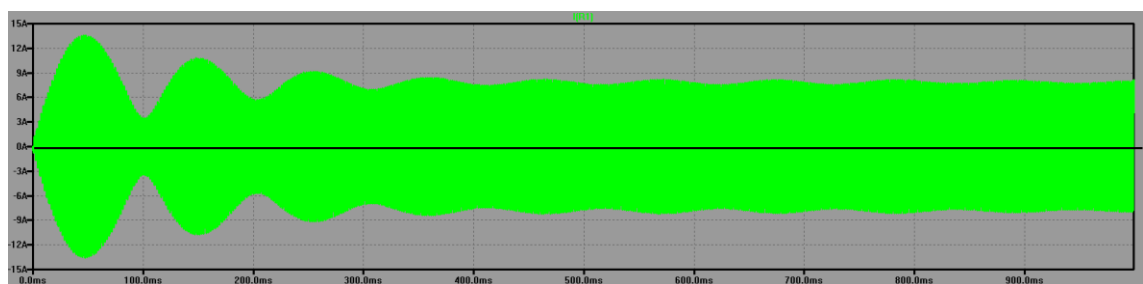
Kuten odotettua, virta tosiaan on huipussaan taajuudella 503,xx Hz lukematarkkuuden rajoissa. Kuvan 18 pystyasteikko on logaritminen, joten piikki vaikuttaa todellista pie-



nemmältä. Kuvasta voidaan myös tulkita kytkennän vahvistavan signaalia alueella 496...510 Hz, muilla taajuuksilla vaimennus on voimakasta.

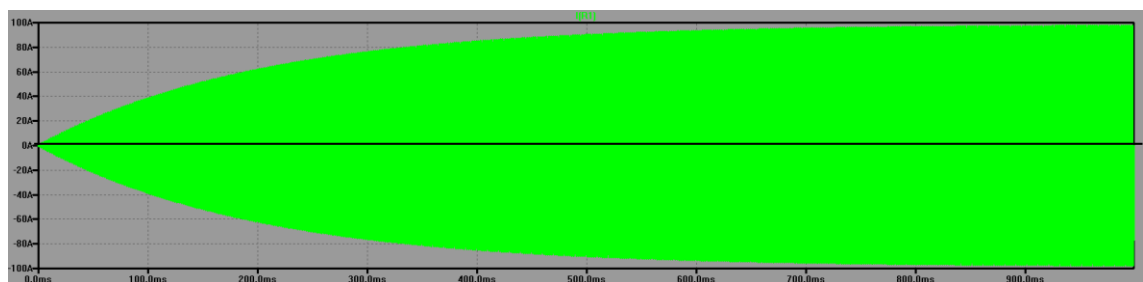
Nuolella merkitty heikosti erottuva katkoviiva kuvaa virran vaihekulmaa. Resonanssitaajuuden alapuolella se on noin  $90^\circ$ , resonanssitaajuudella  $0^\circ$  ja sen yläpuolella noin  $-90^\circ$ . Tästä voidaan päätellä, että kytkentä näyttää ulospäin joko kapasitiiviselta tai induktiiviselta, taajuudesta riippuen.

Mallinnetaan resonanssia vielä vähän tarkemmin: sama kytkentä kuten edellä, tällä kertaa syöttöjännitteen taajuus 490 Hz:



Kuva 19. Simuloitu vaimeneva värähtely, vaaka-akseli 1 s.

Taajuuden ollessa alle resonanssitaajuuden syntyy värähtely, joka vaimenee muutamassa sadassa millisekunnissa. Tilanne on toinen, kun taajuutta nostetaan 500 Hz:iin:



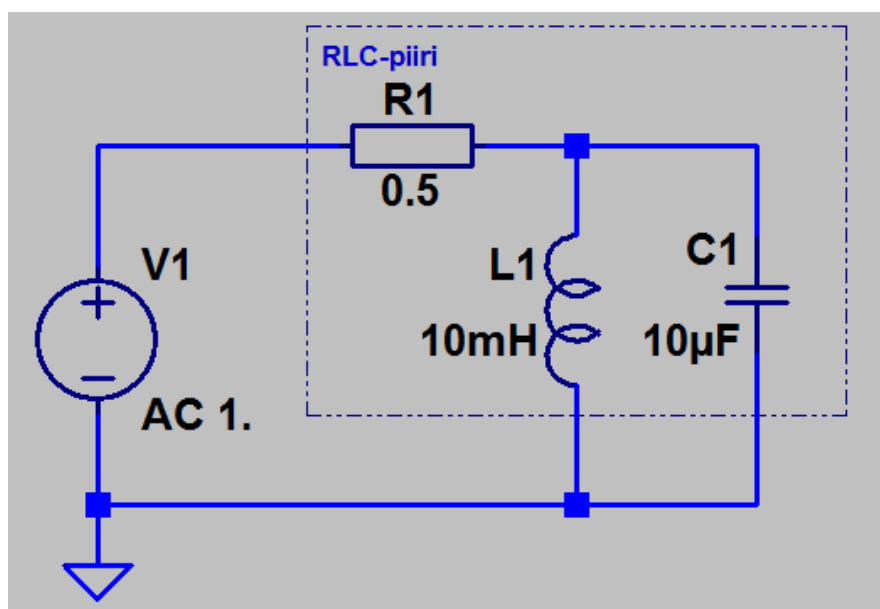
Kuva 20. Simuloitu vaimentumaton värähtely, vaaka-akseli 1 s.

Kun taajuus on tarpeeksi lähellä resonanssitaajuutta, värähtely ei enää vaimene. Amplitudi jatkaa kasvamistaan, kunnes piirin resistanssi rajoittaa sen. Jos resistanssi poistetaan kokonaan, kytkentä muuttuu teoriassa oikosuluksi. Todellisilla keloilla ja kondensaattoreilla on aina hieman resistanssia, joten aivan näin ei todellisuudessa käy.

Sarjaresonanssista on syytä huomata eräs seikka: syöttöjännitteen amplitudi on edellä käytetyssä simulaatiossa 10 V, mutta 500 Hz:n taajuudella kelan ja kondensaattorin yli on noin 625 V. Jännitteet ovat kuitenkin  $180^\circ$  vaihesiirrossa keskenään, joten niiden summa ulkoapäin katsottuna on nolla. Voidaankin todeta, että sarjaresonanssipiirissä sisäiset jännitteet voivat nousta hyvin suuriksi.

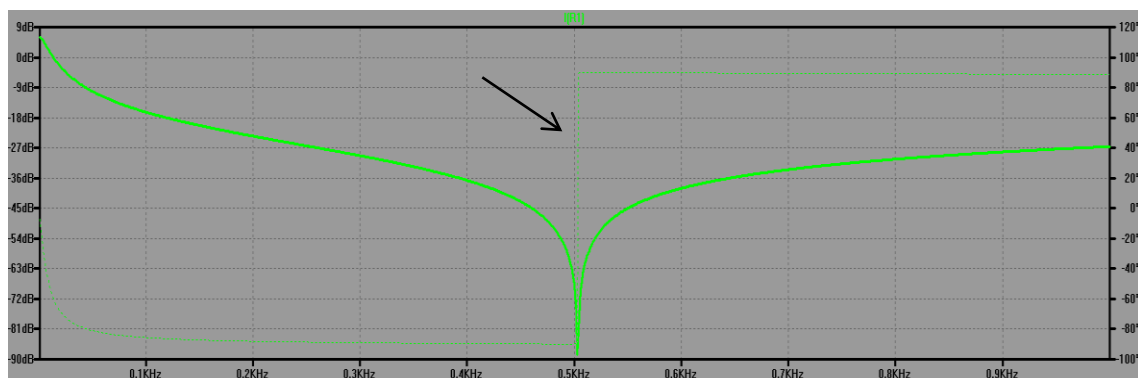
### 3.3.2 Rinnakkaisresonanssi

Rinnakkaisresonanssipiirissä induktanssi ja kapasitanssi ovat rinnan, kuten arvata saattaa. Piirin impedanssi käyttäytyy päinvastaisella tavalla kuin sarjaresonanssissa. Simuloidaan seuraavanlainen kytkentä:



Kuva 21. Simulaatiokytcentä, rinnakkaisresonanssi.

Käytetään samoja komponenttiarvoja kuin edellä ja tehdään taas taajuuspyyhkäisy välillä 1...1 000 Hz:



Kuva 22. RLC-rinnakkaispiiri, virta taajuuden funktiona.

Kuvaaja näyttää hyvin samanlaiselta kuin sarjapiirissä, mutta peilikuvana. Resonanssitaajuus on sama noin 503 Hz, mutta tällä kertaa virta on pienimmillään resonanssissa. Virran vaihekulma käyttäytyy myös päinvastaisesti: resonanssitaajuuden alapuolella se on  $-90^\circ$  ja yläpuolella  $90^\circ$ . Kytkenässä resonanssiin sisäiset virrat voivat olla suuria, vaikka syötöstä otettu virta olisi teoriassa nolla. Resonanssissa rinnakkaispiiri siis näyttää ulospäin katkokselta.

Simulointitulosten pohjalta voidaan resonanssiin päätellä seuraavaa:

- Sarjaresonanssissa ulospäin näkyvä impedanssi on pienimmillään.
- Rinnakkaisresonanssissa impedanssi on suurimmillaan.
- Resonanssiin voidaan käyttää suodattimena tietyille taajuuksille.

### 3.3.3 Kompensointi ja resonanssiriski

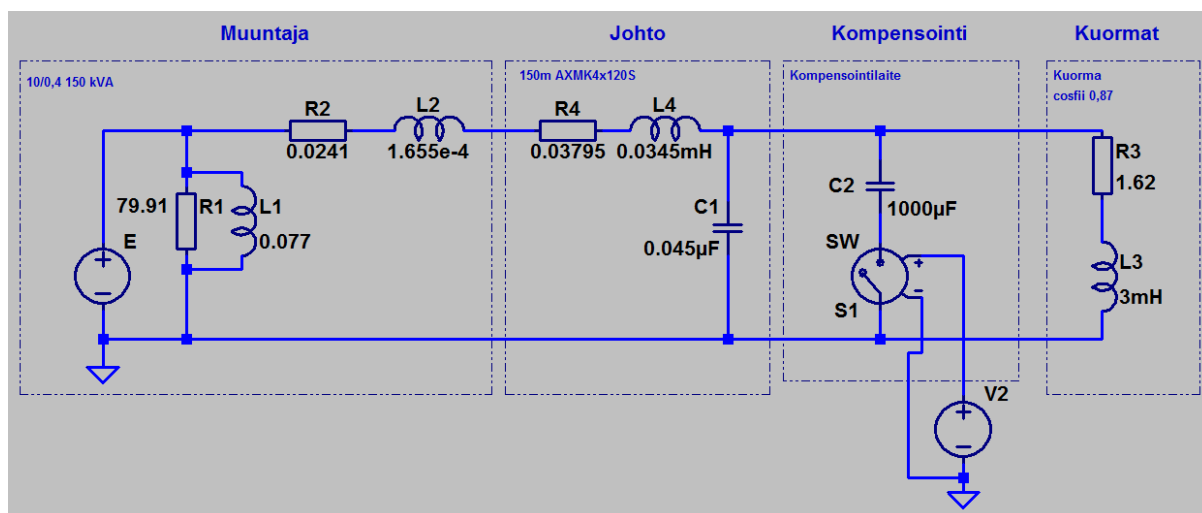
Heikon tehokertoimen omaavien laitteiden loistehonkulutusta kompensoidaan yleisesti kompensointiparistoilla. Yksinkertaisimmillaan kompensointilaitte koostuu useasta kondensaattorista ja niiden kytkentään käytettävistä laitteista. Kondensaattoreita kytketään sopivissa ryhmissä kiinni verkkoon niin, että saadaan sopiva määrä kompensointitehoa tuotettua. Näitä kutsutaan kompensointiporaisiksi.

Kompensoinnilla on tarkoitus tuottaa loistehoa mahdollisimman lähellä sitä kuluttavia laitteita, jotta sitä ei syöttävästä verkosta tarvitse ottaa. Tämä on viisasta, sillä sähköyhtiöllä on tapana laskuttaa loistehosta suuremmissa liittymissä.

Kuormituksen tehokerroin pyritään saamaan johonkin ennalta määrättyyn arvoon, esimerkiksi  $0,995_{\text{IND}}$  [8.]. Kompensointilaitte mittaa tehokerrointa ja ohjaa kontaktoreilla kompensointiportaita päälle tai pois.

Tässä yhteydessä tehokertoimella tarkoitetaan perustaaajuista tehokerrointa  $\cos \varphi$ . Kytkenältäään kompensointiparisto on normaalitilanteessa verkon kannalta rinnakkaisresonanssiipiiri, jossa induktanssi kuvaa loistehon kulutusta, kapasitanssi sen tuotantoa ja resistanssi pätötehon kulutusta. Kun kapasitanssissa tuotetaan yhtä paljon loistehoa kuin induktanssissa kulutetaan, verkosta otetaan vain pätötehoa.

Resonanssitilanteessa käy kuitenkin niin, että kompensointilaitteen kapasitanssin ja verkossa olevan induktanssin välille syntyy sarjaresonanssi. Induktanssi voi olla esimerkiksi syöttävä muuntaja. Havainnollistetaan asiaa laatimalla sijaiskytkentä rakennuksen pienjänniteverkosta:



Kuva 23. Simuloitu yksinkertaistettu pienjänniteverkko.

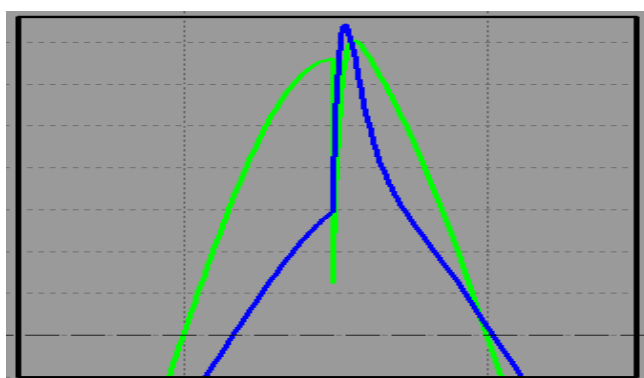
Simuloinnissa käytetty yksivaiheinen sijaiskytkentä koostuu 150 kVA:n muuntajasta, 150:stä metristä AXMK 4x120S kaapelia, kompensointilaitteesta ja induktiivisesta kuormituksesta. Kuormaa on noin 84 kVA tehokertoimella  $0,87_{\text{IND}}$ . Kompensointilaitteen ohjausta kuvaa kytkin S1, jolla voidaan kytkeä kondensaattori C2 kiinni verkkoon. Tar-

kastellaan ensin kompensoinnin normaalia toimintaa seuraamalla virtaa ja jännitettä muuntajalla seuraavasti:



Kuva 24. Simuloidun muuntajan jännite ja virta.

Kuvasta 24 voitiin nähdä, miten kompensoinnin kytkentä vaikuttaa virran vaihekulmaan. Ennen kytkentää (1. nuoli) tehokerroin on noin  $0,86_{IND}$ , kytkennän jälkeen (3. nuoli) se nousee arvoon noin  $0,99_{IND}$ . Kytkentähetki on keskellä näkyvä paksu pystyviiva. Kompensointilaite on suorittanut kytkennän jännitteen nollakohdassa, joten suurta virtapiikkiä ei esiinny. Jos kytkentähetki on sattumanvarainen, voi aiheutua suuria transientteja:

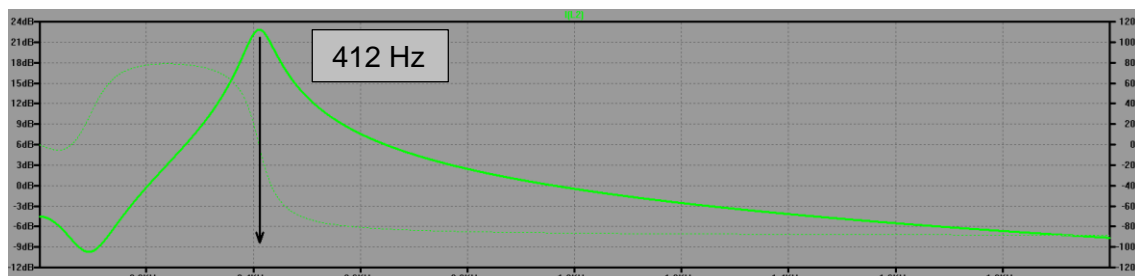


Kuva 25. Kondensaattorin kytkentä jännitteen huippukohdassa.

Jos kondensaattori kytketään täyteen jännitteeseen, varausvirta on suuri. Tässä esimerkissä virran huippuarvo on noin 370 A, kun normaali kuormitusvirta on 122 A RMS. Jännite on alimmillaan noin 60 V. Kovin jäykästä verkosta ei siis voida puhua, mutta

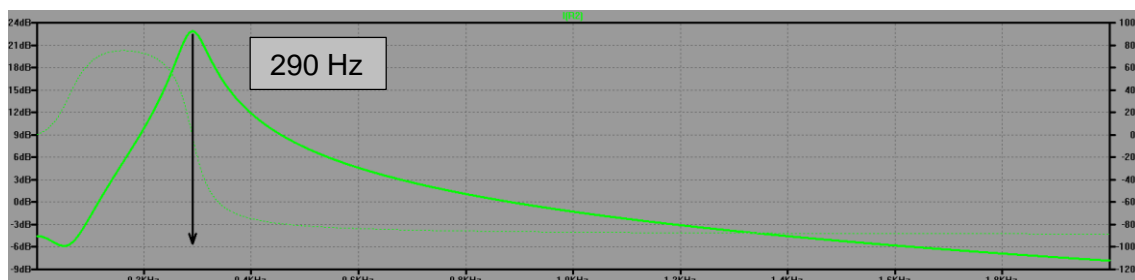
simuloitu tilanne on sikäli lähellä totuutta, että oikosulkuvirrat ovat muuntajalla 4,1 kA ja kuorman luona 2,7 kA.

Tutkitaan verkon taajuusvastetta muuntajalta katsottuna alueella 1...2 000 Hz:



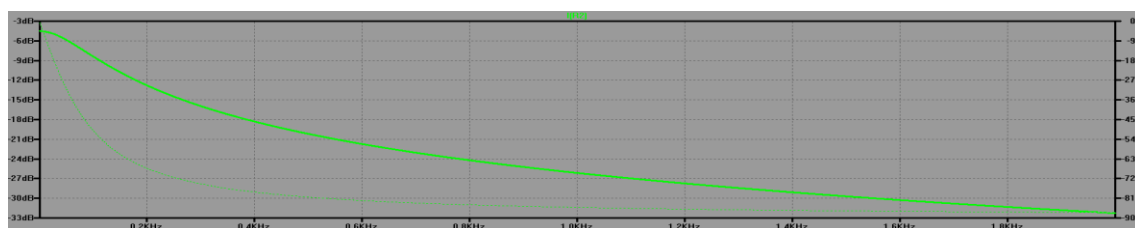
Kuva 26. Taajuusvaste, kompensoitu verkko.

Kun verkko on kompensoitu edellä mainittuun tehokertoimeen 0,99<sub>IND</sub>, pienin impedanssi on taajuudella 412 Hz. Jos kompensointiasetusta muutetaan, muuttuu myös taajuusvaste. Katsotaan miten se muuttuu, kun kompensointia on liikaa:



Kuva 27. Taajuusvaste, ylikompensoitu verkko.

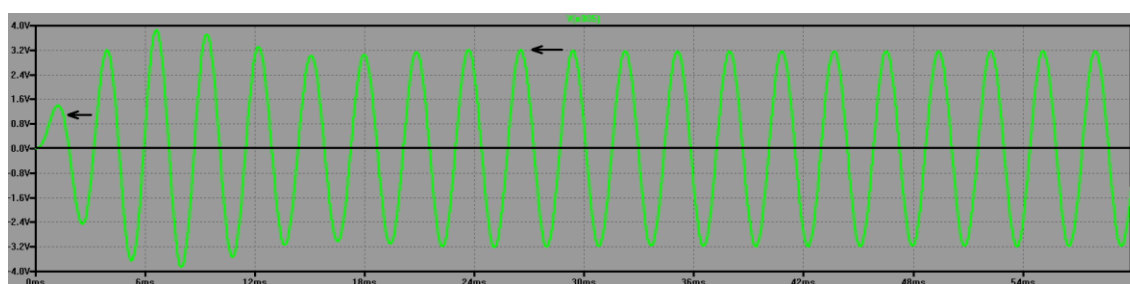
Nostamalla kompensointiteho kaksinkertaiseksi resonanssitaajuus laskee arvoon 290 Hz. Jos taas kompensointi on kokonaan pois päältä, verkon taajuusvaste näyttää täysin erilaiselta:



Kuva 28. Taajuusvaste, verkko ilman kompensointia.

Kun kompensointia ei ole (ks. ed. s.), verkko näyttää muuntajalta katsottuna induktiiviselta koko taajuusalueella, eikä resonanssia pääse syntymään. On huomattava, että kuvassa 28 on eri skaalaus pystyakselilla, mutta siitä huolimatta aiemmissa kuvissa nähty piikki puuttuu kokonaan. Lähemmällä tarkastelulla voidaan huomata myös se, että perustaajuuden 50 Hz kohdalla verkon taajuusvaste on kaikilla kompensointiasteilla käytännössä sama.

Tarkastellaan vielä resonanssitilannetta samassa verkossa siten, että syötetään muuntajalta yliaaltojännitettä verkkoon. Otetaan esimerkiksi amplitudiltaan yhden voltin ja taajuudeltaan 350 Hz:n jännite:



Kuva 29. Jännitteen nousu resonanssissa.

Muuntajan syöttämä yhden voltin jännite nousee resonanssissa yli kolmeen volttiin. Resonanssitilanteista ja kompensoinnista voidaan simulointitulosten perusteella päätellä seuraavaa:

- Resonanssissa voi esiintyä syöttöjännitettä suurempia jännitteitä ja isoja virtoja.
- Verkon kompensointiaste vaikuttaa resonanssitaajuuteen.
- Resonanssiriski kasvaa, jos kompensointilaite toimii virheellisesti aiheuttaen yli-kompensointia.

### 3.3.4 Muille laitteille aiheutuvat häiriöt

Häviöiden lisääntymisen ja resonanssien lisäksi yliaalloista voi aiheutua toimintahäiriötä herkille laitteille. Häiriöt voivat siirtyä laitteisiin kahdella tapaa: johtumalla tai säteilemällä. Johtuvat häiriöt siirtyvät verkossa normaaleja virtateitä pitkin, säteilevät nimensä

mukaisesti ilmaitse. Laitteiden herkkyys häiriöille vaihtelee, erityisen herkkiä ovat tietotekniset laitteet. Helpoiten häiriintyy usein laitteiden välinen tietoliikenne, jossa jännitetasot ovat pieniä ja taajuudet voivat olla suuriakin.

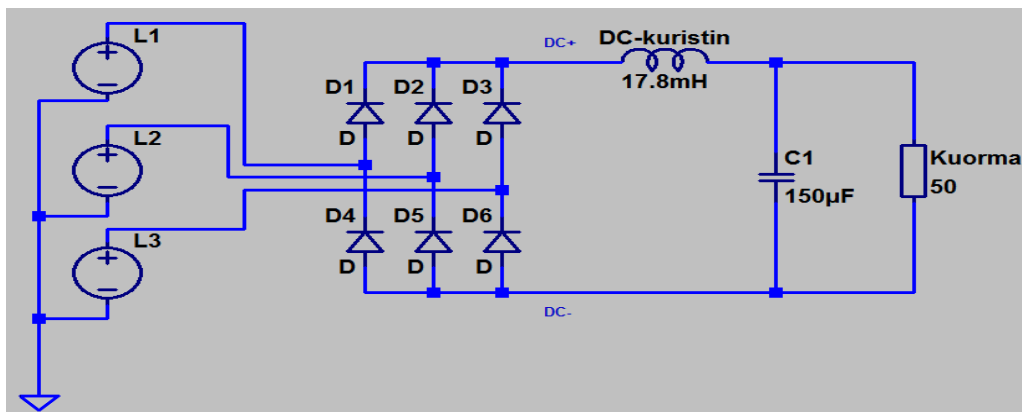
Ääriesimerkki yliaaltojen aiheuttamasta tietoliikennehäiriöstä on etäluettavien kWh-mittarien luennan estyminen. Mittareita voidaan lukea joko radioteitse tai sähköverkon kautta PLC-tekniikalla (*engl. Power Line Communication*). Verkon kautta luennassa olleita mittareita on ollut jopa satoja ilman yhteyttä, kun yliaallot ovat aiheuttaneet jännitesäröä riittävän korkealla taajuudella (50...100 kHz). Pahimmat häiriöt ovat aiheutuneet pienitehoisista hakkurivirtalähteistä, jotka ovat ikääntymisen myötä alkaneet tuottaa korkeataajuisia yliaaltovirtoja. Myös pienehköt taajuusmuuttajat ovat aiheuttaneet luentaongelmia, vaikkakin pienemmässä mittakaavassa. [9, s. 60.]

### 3.4 Yliaaltopitoisuuksien vähentäminen

Verkon yliaaltopitoisuutta voidaan vähentää kahdella tavalla, joko estämällä niiden synty tai suodattamalla ne pois verkosta. Yliaaltojen määrään ja taajuuteen voidaan vaikuttaa suuntaajalaitteen rakennetta muuttamalla sekä laitteen sisäisellä suodatuksella.

#### 3.4.1 Induktanssin vaikutus suuntaajassa

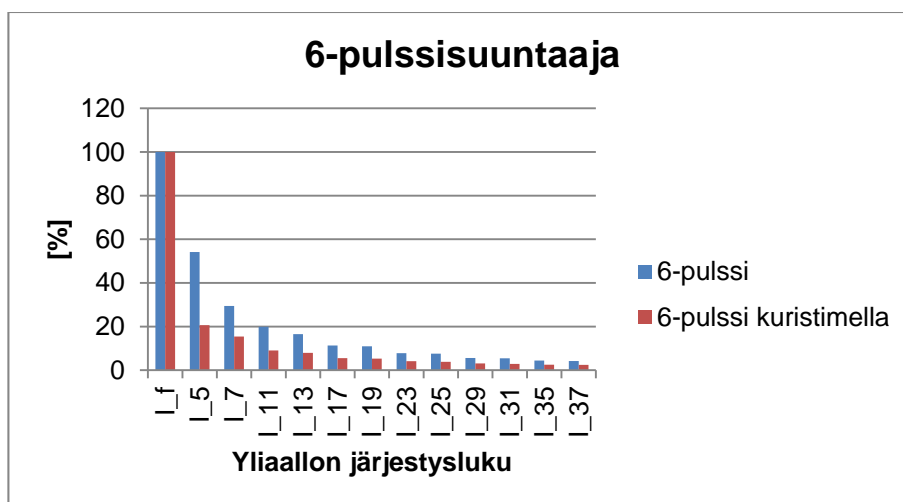
Luvussa 2.2.3 käsiteltiin kolmivaiheista tasasuuntaajaa, jossa ei ollut lainkaan induktanssia piirissä. Todellisissa laitteissa induktanssia kuitenkin lähes aina on. Otetaan esimerkiksi sama kytkentä, mutta varustetaan DC-välipiiri kuristimella seuraavasti:



Kuva 30. Kolmivaihesuuntaaja, DC-välipiiri kuristimella.



Kuristimen induktanssi on valittu siten, että se on 100 mH/kW [3, s. 22.]. Suuntaajan syöttämä kuorma on noin 5,6 kW. Vaikutus yliaaltopitoisuuteen on huomattava:



Kuva 31. DC-kuristimen vaikutus yliaaltopitoisuuteen simulaatiokytkennässä.

DC-piirissä oleva kuristin hidastaa nopeita muutoksia kondensaattorin varausvirrassa. Tämä näkyy suoraan pienempinä piikkeinä suuntaajan ottovirrassa. Tässä esimerkissä syöttävän verkon impedanssia ei ole huomioitu, eli todellisuudessa yliaaltovirrat olisivat hieman pienemmät. Todellisissa laitteissa kuristimia voidaan käyttää myös verkko-syötön puolella, joko sisäänrakennettuna tai erillisenä laitteena.

### 3.4.2 Suuntaajan pulssiluvun nostaminen

6-pulssinen suuntaaja tuottaa sille tyypillisiä yliaaltoja, joiden järjestysluvut voitiin määrittää yhtälön 3 avulla seuraaviksi:

$$n = k * 6 \pm 1 \rightarrow n = 5, 7, 11, 13, 17, 19 \dots$$

12-pulssinen suuntaaja tuottaa seuraavat yliaallot:

$$n = k * 12 \pm 1 \rightarrow n = 11, 13, 23, 25, 35, 37 \dots$$

24-pulssinen puolestaan omanlaisensa yliaaltoparit:

$$n = k * 24 \pm 1 \rightarrow n = 23, 25, 47, 49, 71, 73 \dots$$

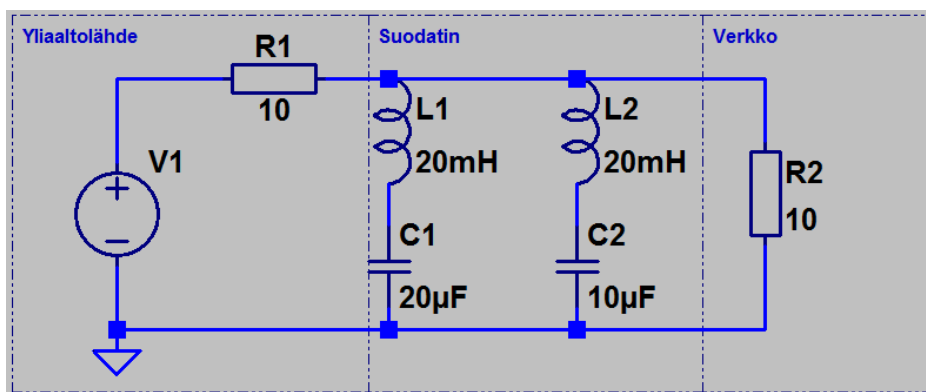
Pulssiluvun nostaminen johtaa matalampien yliaaltotaajuuksien poistumiseen. Mitä korkeammiksi taajuudet nousevat, sitä enemmän verkon impedanssi niitä vaimentaa. Käytännössä 12- ja 24-pulssiset suuntaajat ovat rakenteeltaan rinnankytkettyjä 6-pulssisiltoja, joita syötetään eri muuntajista. Toista siltaa syöttää tähteen- ja toista kolmioon kytketty muuntaja, näin saadaan syöttöjännitteisiin  $30^\circ$  vaihe-ero. Muuntajat voivat olla erillisiä kaksikäämimuuntajia tai voidaan käyttää yhtä kolmikäämimuuntajaa. 24-pulssinen ratkaisu vaatii kahden kolmikäämimuuntajan käyttämistä. [3, s. 19.]

### 3.4.3 Itsekommutoituvien suuntaajien käyttäminen

Tähän asti on käsitelty vain ohjaamattomia verkkokommutoituja kytkentöjä. Näiden ohella käytetään paljon myös ohjattavia komponentteja. Näitä ovat esimerkiksi GTO-tyristorit ja IGBT-transistorit. Olennaisin ero ohjaamattomaan diodisiltaan nähden on kyky toimia sekä tasa- että vaihtosuuntaajana, tehoa voidaan kuljettaa molempiin suuntiin. IGBT-sillalla saadaan yliaaltopitoisuudet kaikkein matalimmiksi ja tehokerroin lähelle yhtä. Huonona puolena on korkeampi hinta. [3, s. 20.]

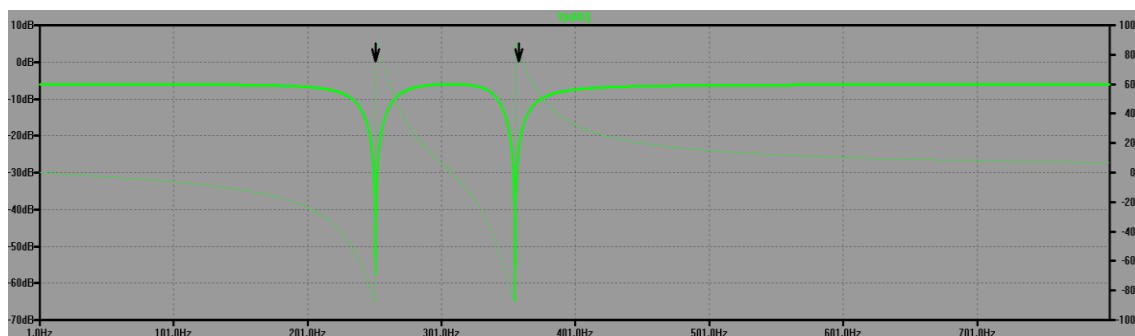
### 3.4.4 Yliaaltosuodattimet

Yliaaltoja voidaan poistaa verkosta suodattamalla. Suodattimia on passiivista ja aktiivista tyyppiä. Passiivisuodatin perustuu resonanssipiiriin, minkä toimintaa käsiteltiin luvussa 3.3. Suodatukseen voidaan käyttää sarja- tai rinnakkaisresonanssia, tilanteesta riippuen. Suodattimella voidaan poistaa yhtä tai useampaa yliaaltotaajuutta, riippuen siitä, miten se viritetään. Laaditaan esimerkisuodatin viidennelle ja seitsemännelle yliaallolle:



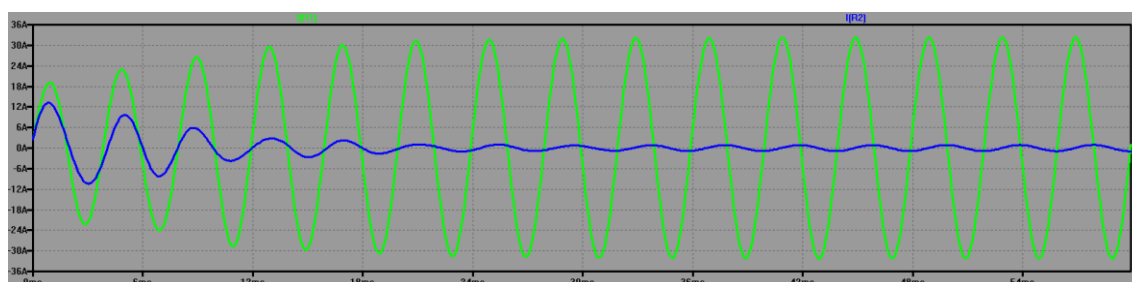
Kuva 32. Yliaaltosuodatin taajuuksille 250 Hz ja 350 Hz.

Jännitelähde V1 kuvaa yliaaltoja synnyttävää laitetta. Suodattimen komponenttiarvot on saatu yhtälöstä 4. Tarkastellaan taajuusvastetta yliaaltolähteen luona:



Kuva 33. Suodattimen impedanssi taajuuden funktiona alueella 0...800 Hz.

Suodattimen viritystaajuuDET näkyvät selvänä piikkeinä, muualla impedanssi on miltei vakio. KytKentä toimii sarjaresonanssipiirinä yliaalloille, tarjoten niille pieni-impedanssisen sulkeutumistien. Näin ne eivät leviä pidemmälle verkkoon. Todellisessa suodattimessa piikit eivät olisi näin teräviä, eikä taajuusvaste näin ideaalinen. Katso-taan vielä miten yliaaltovirrat vaimenevat:



Kuva 34. 250 Hz:n yliaaltovirta ennen ja jälkeen suodattimen.

Vihreällä virta vastuksessa R1 ja sinisellä vastuksessa R2. Kun piiri on resonanssissa, virta ennen suodatinta on 5 A, sen jälkeen noin 140 mA.

Passiivista yliaaltosuodatusta käytetään myös loistehon kompensoinnin yhteydessä. Kompensointiparisto varustetaan kondensaattorien kanssa sarjaan kytketyillä keloilla (kuristimilla), samoin kuten tässä esimerkissä. Kelojen induktanssi valitaan siten, että resonanssitaajuus on sellainen, jolla ei yliaaltoja ole. Tämän tyyppistä kompensointilaitetta kutsutaan estokelaparistoksi. On yleistä, että ilman estokeloja olevia paristoja ei

enää saa verkkoon liittää, kasvaneiden yliaaltopitoisuuksien vuoksi. Viritystaajuus vaihtelee alueittain, mutta se voi olla esimerkiksi 141 Hz tai 189 Hz. [10.]

Aktiivinen yliaaltosuodatin muistuttaa rakenteeltaan taajuusmuuttajaa. Suodatus perustuu epälineaaristen kuormien ottaman särövirran kompensointiin vastakkaisvaiheisella virralla. Suodatinlaite on rinnan kuormien kanssa. Aktiivisuodatin pystyy reagoimaan kuormitusvirran muutoksiin hyvin nopeasti, jopa alle yhdessä millisekunnissa. [11, s. 4.]

## 4 Sähkön laadulle asetetut vaatimukset

### 4.1 Yleisen jakeluverkon jännitteen laatu

Laitteiden oikean toiminnan ja kestävyys takaamiseksi niiden syöttöjännitteen tulee täyttää tietyt kriteerit. Euroopassa nämä vaatimukset on koottu standardiksi EN 50160. Tähän perustuu kansallinen standardimme *SFS-EN 50160 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet*. Standardi kattaa pien- keski- ja suurjännitejakelun. Jakelujännitteen laatua tarkastellaan asiakkaan verkon ja jakeluyhtiön verkon liittämiskohdassa. Standardissa määritellään jännitteelle seuraavat ominaisuudet:

- taajuus
- suuruus
- aaltomuoto
- kolmivaihejännitteen symmetria.

Määrittelyt koskevat vain normaalia verkon käyttötilannetta, ei esimerkiksi ulkopuolisista häiriöistä tai asiakkaan omista laitteista aiheutuvia poikkeamia. Käydään seuraavaksi läpi joitakin standardin määrittelemiä rajoja.

Taulukko 2. Verkkotaajuuden ja -jännitteen rajat pienjännitejakelussa. [12, s. 20, mukailen.]

Taajuus, 10 s keskiarvo	
49,5...50,5 Hz	99,5 % vuodesta
47...52 Hz	100 % ajasta
Jännitetaso	
Viikon aikana, 10 min keskiarvo	
±10 %	95 % keskiarvoista
Kaikkina aikoina, 10 min keskiarvo	
+10...-15 %	

Taulukon 2 arvot koskevat normaalia, synkronisesti yhteen kytkettyä laajaa verkkoa. Erillisverkoissa sallitaan suurempia poikkeamia. Taajuusrajojen suuruusluokka on kymmenkertainen verkon normaaliin taajuussäätöön verrattuna. Näiden rajojen pysyvä ylitys on verkon kannalta vakava häiriötilanne, joka vaatii manuaalisia toimenpiteitä. [13, s. 6.]

Harmoniset yliaaltojännitteet kuuluvat tämän työn aihepiiriin, joten tarkastellaan myös niille asetettuja rajoja. Standardissa annetaan seuraavat suositukset:

Taulukko 3. Harmoninen yliaaltojännite, suhteessa perustaajuuteen. [12, s. 22, mukailen.]

Harmoninen yliaaltojännite			
Parittomat		Parilliset	
<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
3	5	2	2
5	6	4	1
7	5	6...24	0,5
9	1,5		
11	3,5		
13	3		
15	0,5		
17	2		
19	1,5		
21	0,5		
23	1,5		
25	1,5		

Taulukossa 3 korostettuna kolmannet yliaallot. Niiden erityisen haitallisuuden vuoksi sallitut pitoisuudet ovat pieniä. Mittausmenetelmä on sama viikon mittausjakso kuin edellä esitetty taajuuden ja jännitteen mittausta.

Lisäksi asetetaan vaatimus jännitteen kokonaissärölle, enintään 8 %. Kokonaissärö (engl. *Total Harmonic Distortion, THD*) on yksittäisten yliaaltokomponenttien summan suhde perustaajuuteen. Laskutapa on seuraava:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2}}{u_f} \quad (5)$$

Kyseessä on siis yliaaltokomponenttien  $u_h$  geometrinen summa suhteessa perustaajuuteen  $u_f$ . Komponenttien summa lasketaan yliaalloille järjestysluvuiltaan 2...40.

## 4.2 Yliaaltovirtojen raja-arvot

Yliaaltojen haittavaikutuksia pyritään vähentämään asettamalla rajoja niiden syntymiselle. Yksittäisille laitteille on omat standardinsa ja suuremmille sähköjärjestemille omansa.

### 4.2.1 Suuri sähkölaitteisto

Standardissa IEEE 519 annetaan suosituksia harmonisten virtojen enimmäismäärille. Rajat koskevat virtoja sähkölaitteiston liityntäpisteessä. Liityntäpisteeksi katsotaan syöttävän muuntajan ala- tai yläjännitepuoli riippuen siitä, onko kyseessä keski- vai pienjänniteliittymä. Sallitut pitoisuudet riippuvat muuntajan koosta, sillä se vaikuttaa syntyvän yliaaltojännitteen suuruuteen. Standardissa annetaan seuraavat suositukset:

Taulukko 4. Suurin suositeltava virtasäro liittytäpisteessä. [14, s. 7, mukailten.]

Suurin sallittu virtasäroprosentti 120 V...69 kV järjestelmässä						
Ik / In	Parittomat					TDD
	3...11	11...17	17...23	23...35	35...50	
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20
Parilliset max 25 % parittoman raja-arvosta						

Taulukossa TDD (Total Demand Distortion) lasketaan kuten THD, mutta harmonisten osuus suhteutetaan kuormitusvirran maksimiin. Tämä maksimi saadaan laskemalla keskiarvo viimeisen vuoden kuukausikohtaisista maksimikuormituksista.  $I_k / I_n$  -arvo on liittytäpisteen oikosulkuvirran suhde edellä mainittuun huippukuormitusvirtaan.

#### 4.2.2 Yksittäiset laitteet

Yksittäisten kulutuslaitteiden yliaaltopitoisuuksia käsittelee standardi IEC 61000-3-2, joka asettaa rajat alle 16 A:n laitteille. Standardissa laitteet jaetaan luokkiin, joita on neljä:

Taulukko 5. Laitteiden luokittelu.

IEC 61000-3-2 laiteluokat	
<b>A</b>	Kolmivaiheiset symmetriset kuormat. Kotitalouslaitteet, paitsi luokkaan D kuuluvat. Työkalut, kiinteästi asennetut. Hehkulamppuhimmentimet. Audiolaitteet. Muihin luokkiin sopimattomat laitteet.
<b>B</b>	Kannettavat työkalut. Hitsauslaitteet harrastuskäyttöön.
<b>C</b>	Valaistuslaitteet.
<b>D</b>	Tietokoneet ja monitorit. Televisiot. Kylmälaitteet, joissa invertterikäyttö.

Tämä luokittelu on hieman yksinkertaistettu, näiden lisäksi on vielä joitakin tarkennuksia ja tehorajoja. Jokaisella luokalla on omat rajansa yliaalloille. Luokkien yliaaltorajat löytyvät kokonaisuudessaan liitteistä, mutta otetaan esimerkiksi valaistuslaitteiden rajat:

Taulukko 6. Luokan C yliaaltorajat.

Laiteluokka C	Parittomat n	Ih / If [%]
	3	30*PF
	5	10
	7	7
	9	5
	11...39	3
	Parilliset n	
	2	2

Valaistuslaitteiden osalta rajat ovat prosentteina perustaajuisesta virrasta *If*. Kolmannen yliaallon sallittu osuus riippuu valaisimen perustaajuisesta tehokertoimesta, jota tässä on merkitty symbolilla *PF*. Mitä parempi tehokerroin valaisimella on, sitä lähempänä 30:tä % sallittu pitoisuus on. Virallisissa mittauksissa käytetään valmistajan ilmoittamaa tehokerrointa ja perustaajuisia virtaa.

#### 4.2.3 LED-valaistus standardin näkökulmasta

Standardissa IEC 61000-3-2:2014 asetetut yliaaltorajat koskevat valaistuslaitteiden osalta teholuokkaa  $\leq 25$  W vain, jos kyseessä on purkausvalaisin. Näin ollen LED-valaisimet ovat rajojen piirissä vasta teholuokassa  $> 25$  W. Tilanne on hieman erikoinen, sillä suurin osa LED-valaisimista on juuri teholtaan alle 25 W. Näiden valaisimien määrä myös kasvaa kovaa vauhtia kun uutta rakennetaan ja loistevalaisimia korvataan ledein. 25 wattia ledivalaistusta edustaa jo kiinteän valaisimen teholuokkaa ja valovirta on noin 2 000 lumenia. Aika näyttää, muodostuuko tästä ongelmaa ja pitääkö myös alempi teholuokka ottaa rajoitusten piiriin.



## 5 Laitteiden yliaaltomittaukset

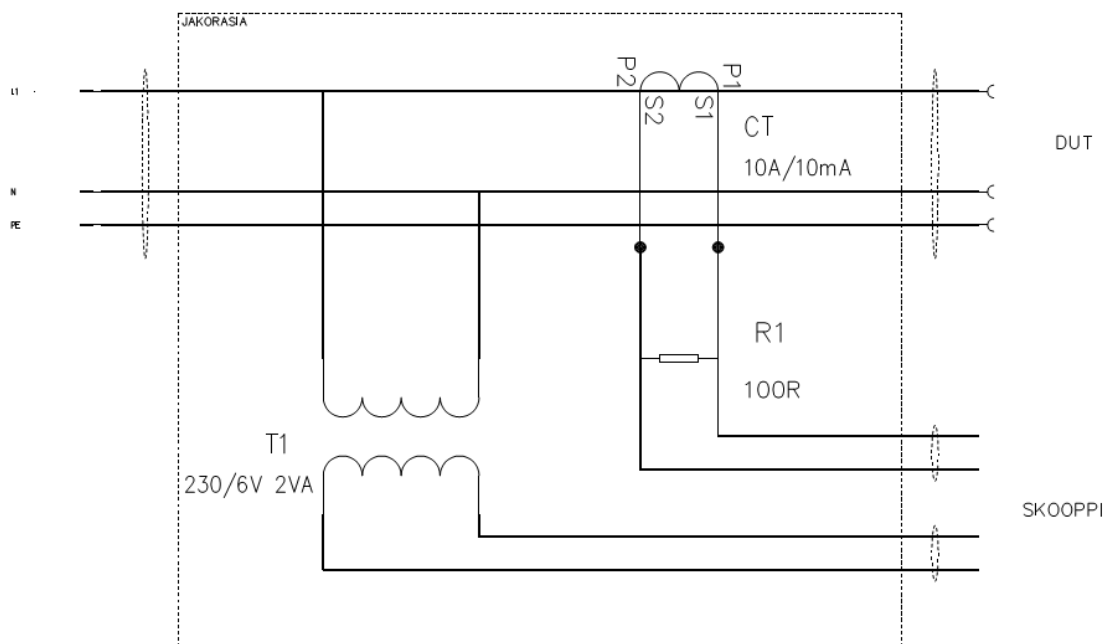
### 5.1 Mittausjärjestely

Laitteiden yliaaltopitoisuuksia tutkittiin itse valmistetulla mittalaitteella. Mittalaite koostuu jakorasiassa olevista mittamuuntajista, oskilloskoopista ja liitäntäjohtoista. Ulko- näöltään laite on seuraavanlainen:



Kuva 35. Omavalmisteinen mittalaite.

Mittalaite kytketään tutkittavan laitteen ja syöttöjohdon väliin. Laitteen läpi kulkee 3G1,5-kumikaapeli, jossa molemmissa päissä sukopistoke / vastake. Oskilloskooppi on USB Instruments DS1M12, johon mittasignaalit tuodaan koaksiaalikaapelein. Laitteen sisäinen kytkentä on seuraava:



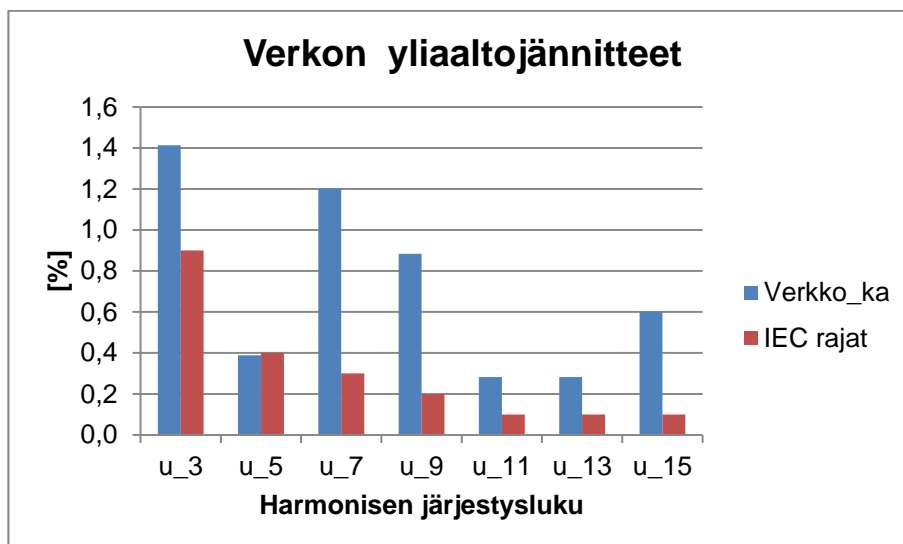
Kuva 36. Mittauskytkentä. DUT on mitattava laite.

Jännitemuuntaja on tavallinen turvallisesti vikaantuva piirikorttimuuntaja, jonka tyhjäkäyntijännite on noin 8,3 V. Virtamuuntaja on myös piirikortille asennettava malli, jonka muuntosuhde on 1 000:1. Valmistajan suositteleman 100  $\Omega$ :n mittausvastuksen avulla saadaan jänniteulostulo 100 mV / A. **Mittamuuntajat on tarkoitettu 50...60 Hz nimellistaajuuksille, joten mittaustuloksiin suuremmilla taajuuksilla on syytä suhtautua varauksella.** Jännitemuuntaja onkin tässä kytkennässä lähinnä vaihekulmien arvioimista varten. **Mittalaite ei luonnollisesti ole tarkoitettu absoluuttisen tarkaksi, vaan suhteellisen vertailun tekemiseen.** Virtamuuntajia käsiteltäessä on syytä muistaa, ettei toisiota saa koskaan jättää auki jos ensiössä kulkee virta. Tässä laitteessa siitä ei ole huolta, sillä mittausvastus on juotettu suoraan virtamuuntajan napoihin. Sähköturvallisuutta on ajateltu tekemällä laite kosketussuojaiseksi myös kansi avattuna.

## 5.2 Syöttöjännitteen yliaaltopitoisuus

Jänniteyliaallot saavat aikaan virtayliaaltoja täysin lineaarisessakin kuormassa. Tämä pitää ottaa huomioon mittaustuloksia tulkitessa. Virallisissa mittauksissa sallitaan tietty yliaaltopitoisuus syöttävässä verkossa, mutta se on hyvin alhainen. Omissa mittauksissa jännitteen yliaaltopitoisuutta arvioitiin mittaamalla yliaaltovirrat kahdesta lineaarises-

ta kuormasta, hehkulampusta ja juotoskolvista. Mittaukset tehtiin kahtena eri vuorokaudenaikana ja niistä otettiin keskiarvo. Tulokset paljastavat, miksi viralliset mittaukset tulee tehdä erillisestä syöttöverkosta:



Kuva 37. Mitatut yliaaltojännitteet ja IEC 61000-3-2 testiverkon rajat.

Kaikki paitsi 5. jänniteyliaalto ovat yli rajojen. Näistä laskettuna seitsemän ensimmäisen parittoman yliaallon kokonaissärö olisi 2,2 %. Kutsutaan tätä lyhenteellä *THDU\_15*. Noin kahden prosentin särö tuntuu uskottavalta arvolla kerrostaloalueella, jossa ei voimakkaita yliaalltolähteitä ole. Standardin SFS-EN 50160 asettamaan rajaan 8 % on vielä matkaa.

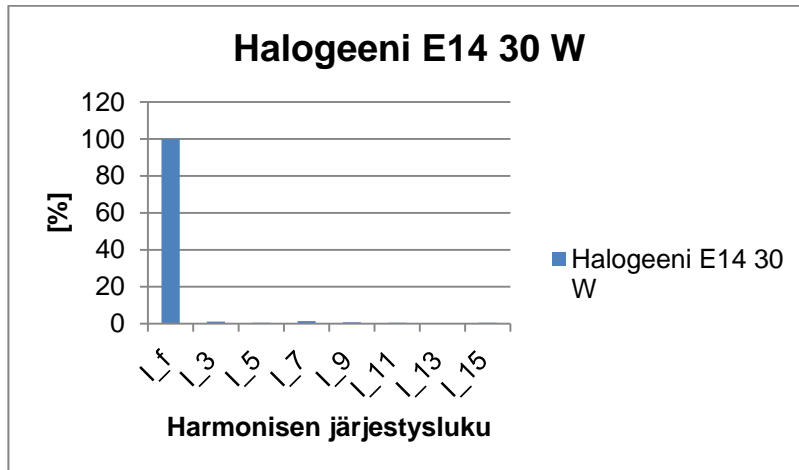
### 5.3 Mitatut laitteet ja mittauksen suoritus

Tutkitut laitteet ovat tavallisia kotitalouden laitteita, lampusta pölynimuriin. Mittauksissa keskityttiin parittomiin yliaaltoihin, pääasiassa järjestyslukuun 15 asti. Virran taajuuspektri saatiin näkyviin oskilloskoopin FFT-muunnostoiminnolla. Arvot kerättiin manuaalisesti oskilloskoopin kursoreita apuna käyttäen ja tallennettiin taulukkolaskentaohjelmaan. Virran aaltomuodosta tallennettiin myös näyttökuva. Lasketut kokonaissärökertoimet on merkitty tunnuksella *THDI\_15* sen selventämiseksi, ettei kyse ole samasta mittausmenetelmästä, millä tämän tyyppiset mittaukset yleensä tehdään. Sähkönläatuaanalyysointilaitteilla tehdyssä mittauksessa otetaan mukaan myös parilliset yliaallot ja mittaus ulotetaan jopa järjestyslukuun 50 asti. Näin ollen tämän työn mittaustulokset

pätevät vain verrattaessa tutkittuja laitteita toisiinsa. Mittaustuloksista on koottu graafisia esityksiä, joista osa esitetään tässä työssä ja osa liitteinä.

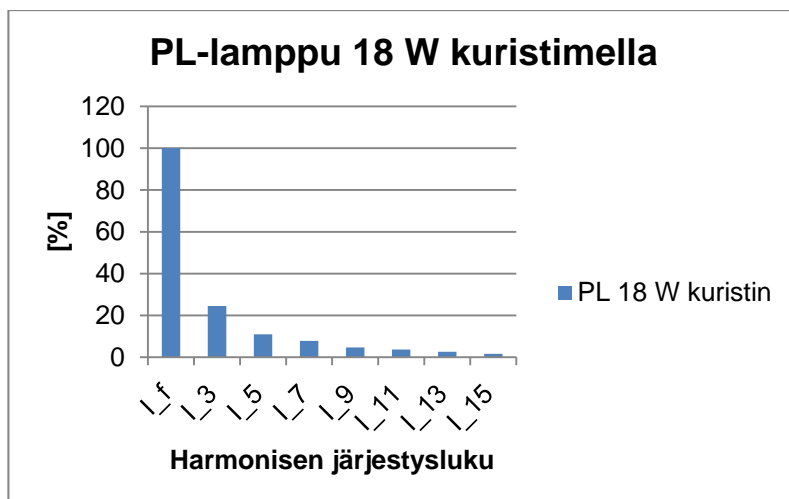
### 5.3.1 Valonlähteet

Valonlähteistä tutkittiin LED-lamppuja, PL-lamppuja ja referenssinä halogeenilamppu. Tarkastellaan, miltä erilaisten lamppujen yliaaltopitoisuudet näyttäivät:



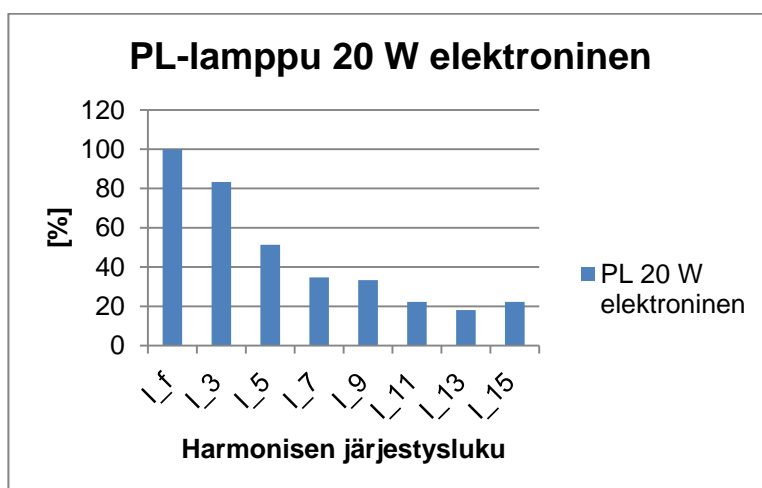
Kuva 38. Lineaarisen kuorman virtaspektri.

Kuten on odotettavissa, ei puhtaasti lineaarisen kuorman virrassa ilmene yliaaltoja, jos ei niitä verkkojännitteessä ole. Suurin pitoisuus halogeenilampulla on noin 1,4 % seitsemännellä yliaallolla. Tämäkin johtuu verkkojännitteestä, ei itse kuormasta. Siirrytään seuraavaksi epälineaarisiiin kuormiin. Katsotaan, miltä näyttää pienoisloistelampun virta:



Kuva 39. Virtaspektri, PL-lamppu magneettisella kuristimella.

Kuristimella varustetussa PL-lamputta alkaa jo näkyä epälineaarisia piirteitä. Tämä johtuu purkauslampusta, jonka resistanssi käyttäytyy epälineaarisesti jännitteen suhteen. Kuristimen suuri induktanssi suodattaa tehokkaasti yliaaltoja, eikä särö ole kovin suuri. Kolmatta yliaaltoa esiintyy kuitenkin noin 25 %. Tämä kyseinen lamppu oli käytämätön mutta todella vanha, nimellisjännite oli vielä 220 V. Seuraavana vuorossa saman teholuokan uudempi, elektronisella liitäntälaitteella varustettu malli:

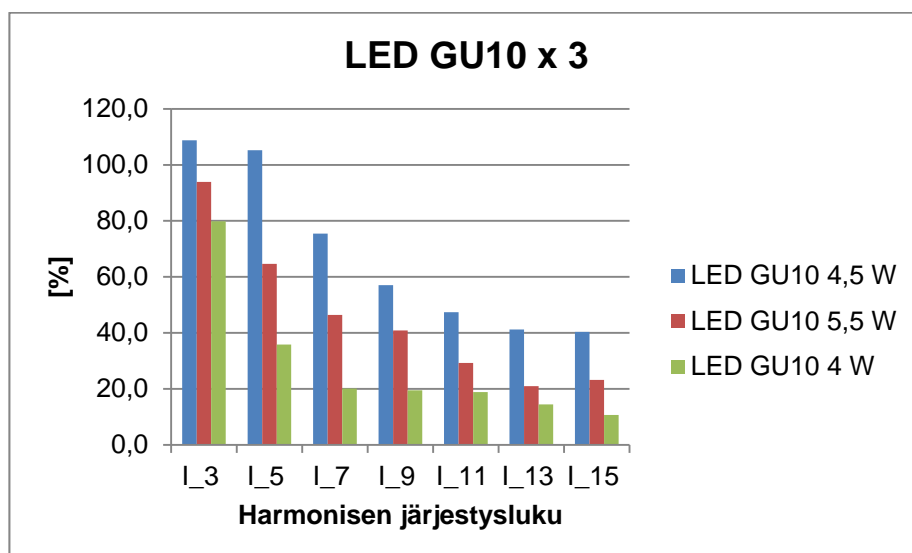


Kuva 40. Virtaspektri, PL-lamppu elektronisella liitäntälaitteella.

Tämä lamppu edustaa hieman uudempaa tekniikkaa. Lampun paino on murto-osan vanhemmasta ja häviöt pienemmät, mutta yliaaltoja syntyy aivan eri tavalla. Tämän tyyppisessä lamputta epälineaarisuus johtuu verkkojännitteen suorasta tasasuuntauksesta, kuten luvussa 2.2.1 kävi ilmi. Kyseisessä lamputta tasasuuntaus oli toteutettu

neljällä erillisellä diodilla, joista muodostuva silta oli kytketty 10  $\Omega$ :n vastuksen kautta lampun kantaan. Mitään verkkopuolen suodatusta ei ollut. Suodatuksen rakentaminen tietysti maksaa ja on hankala toteuttaa pienessä tilassa.

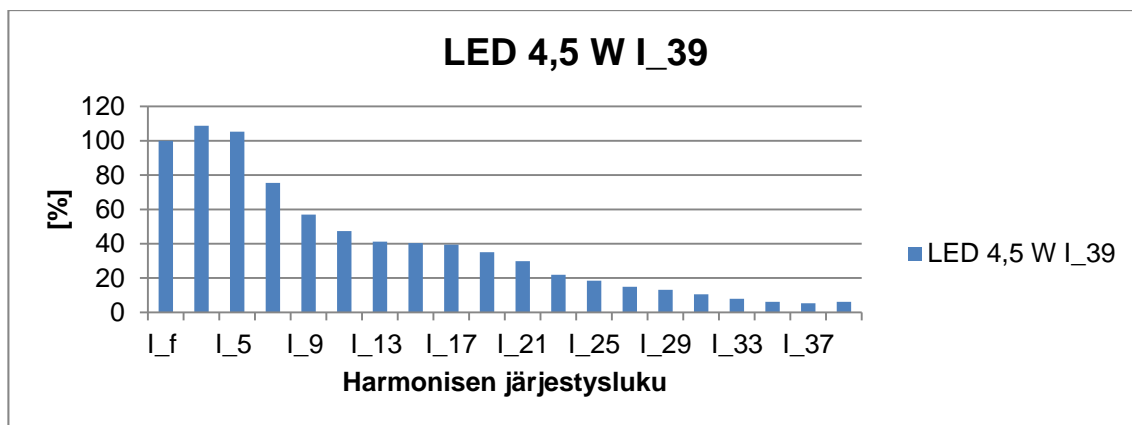
Mennään taas yksi sukupolvi eteenpäin ja siirrytään LED-lamppuihin. Tarkastellaan kolmen eri GU10-kantaisen verkkojännitteisen kohdevalon yliaaltoja:



Kuva 41. GU10-kantaisten ledien yliaaltopitoisuudet.

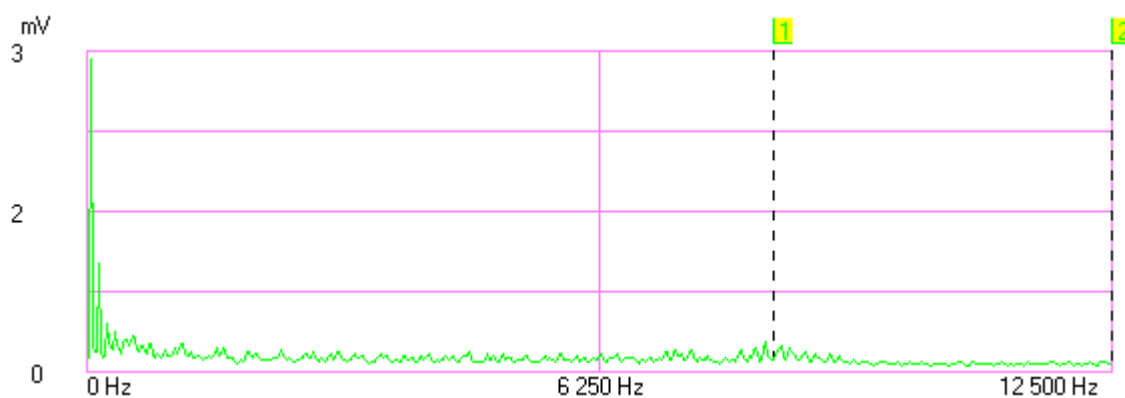
Nyt mukana ovat ainoastaan yliaallot, ei perustaajuutta. Lamput ovat kolmen eri valmistajan, vuosilta 2011...2014. Sinisellä vanhin ja vihreällä uusin. Vanhimmassa on kautta linjan suurempi yliaaltopitoisuus. Olisi mielenkiintoista tietää, onko 4,5 W:n lamppu ollut samanlainen jo uutena, vai onko kyseessä komponenttien vanheneminen. Mittaus olisi ehkä syytä toistaa esimerkiksi vuoden päästä ja verrata nyt saatuihin tuloksiin.

Huomionarvoista on se, että myös viidettä yliaaltoa on vanhimmassa lampussa enemmän kuin perustaajuutta. Uusimman lampun pitoisuudet jäivät puolestaan selvästi pienemmiksi, mikä oli positiivinen yllätys. 4,5 W:n lampun suuri yliaaltopitoisuus herätti mielenkiintoa tutkia virtaspektriä laajemmin. Siitä mitattiin yliaallot myös järjestyslukuun 39 asti:



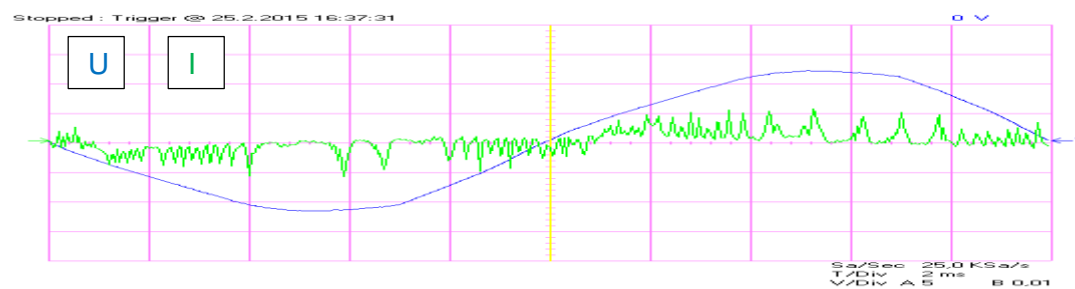
Kuva 42. 4,5 W GU10-ledin laaja virtaspektri.

Spektrissä näkyy huomattavan korkeita taajuuksia. Sama ilmiö esiintyi toisessakin testatussa lampussa, vieläkin voimakkaampana:



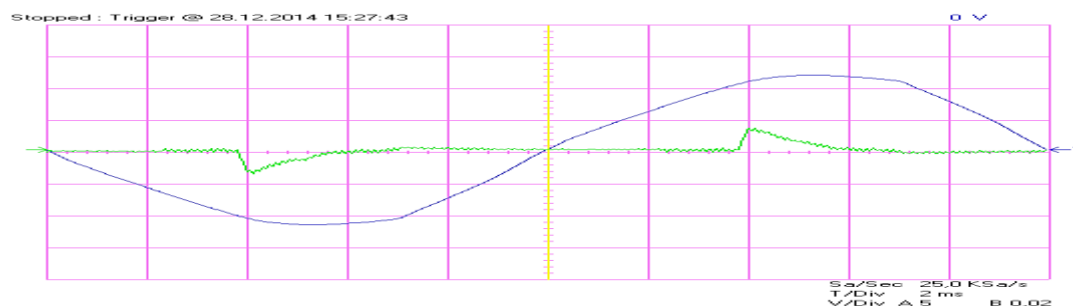
Kuva 43. 9 W LED-alasvalo, virtaspektri taajuualueella 0...12,5 kHz.

Kyseisessä 9 W:n alasvalossa virran spektri on muihin verrattuna aivan erilainen. Eron näkee kaikkein selvimmin virran aaltomuodosta:



Kuva 44. 9 W LED-alasvalo, jännite ja virta.

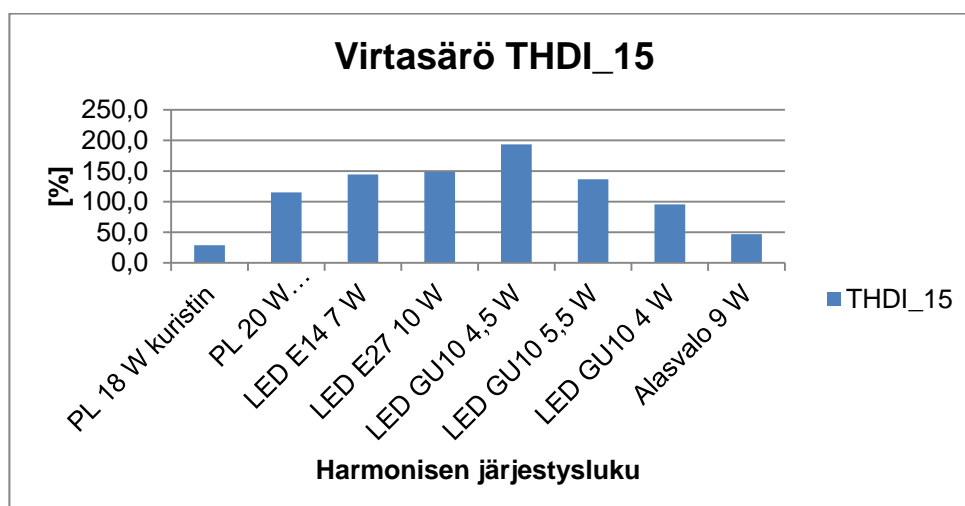
Liitäntälaitteen verkosta ottamassa virrassa ei näytä olevan mitään logiikkaa (ks. kuva 44). Muissa tutkituissa lampuissa ei vastaavaa ilmennyt, vaan virran aaltomuoto on lähempänä sitä, mitä simuloitiin (ks. 2.2.1):



Kuva 45. 5,5 W GU10 LED-spotti, jännite ja virta.

Kuvan 45 virran aaltomuoto on hyvin tyypillinen testatuille lampuille. Tasasuuntaussilta alkaa johtaa noin 65:n asteen kohdalla ja virta otetaan yhtenä pulssina per puolijakso.

Tarkastellaan vielä tutkittujen lampujen virtasärön määrää järjestyslukuun 15 asti. Näin saadaan helpommin kokonaiskuva niiden eroista:



Kuva 46. Lampujen virtasärö, parittomat harmoniset 3...15.

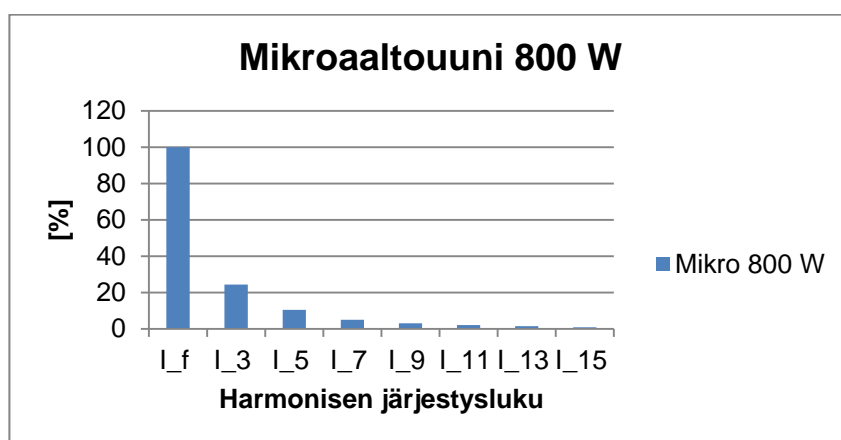
Edellä käsitelty 9 W:n alasvalo näyttää tässä joukossa oikein hyvältä, mutta on muistettava, että tässä on mukana vain yliaallot  $\leq 15$ . Lampun virrasta suuri osa on sitä korkeammilla taajuuksilla. 4,5 W:n ledin tapauksessa  $THDI_{15}$  on 193 %, kun saman lampun  $THDI_{39}$  (kuva 42, s. 41.) on 203 %. Nämä erot alleviivaavat sitä, että kokonaissä-



rön laskemiseksi hyvällä tarkkuudella yliaaltoja pitää ottaa mukaan enemmän kuin 15, jos laite on samantyyppinen kuin nyt mitatut lamput.

### 5.3.2 Kodinkoneet

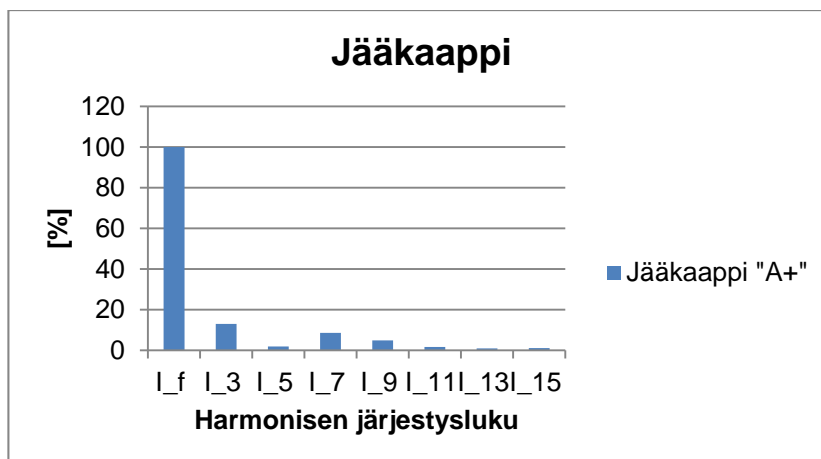
Kodinkoneista mitattiin mikro, jääkaappi, pöytätuuletin ja pölynimuri. Näistä kaikissa paitsi jääkaapissa tiedettiin olevan puolijohdetekniikkaa. Mikrossa tiedetään olevan puolialtotasasuuntaus, mutta vasta korkeajännitemuuntajan jälkeen. Standardi ei suoraan verkosta tapahtuvaa puolialtotasasuuntausta sallisikaan tämän tyyppisessä laitteessa [15, s. 13.]. Mikron yliaaltopitoisuudet jäivät oletettua pienemmiksi:



Kuva 47. Virtaspektri, mikroaaltouuni.

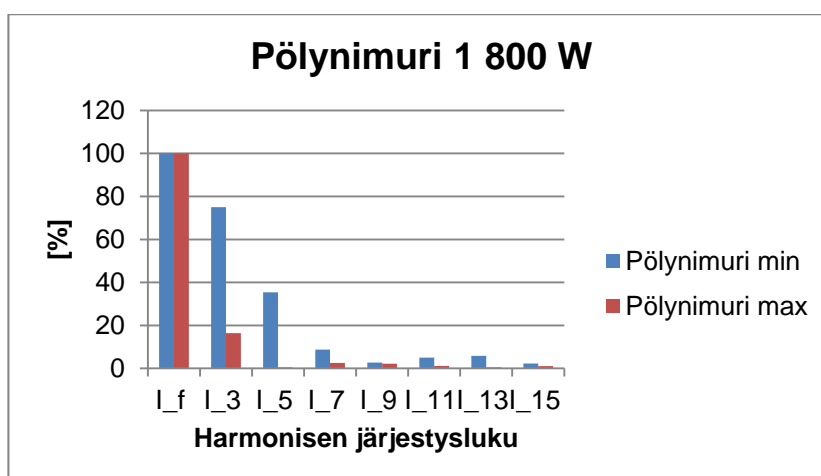
Kolmatta yliaaltoa syntyy silti noin 24 %. Mikron käyttö on kuitenkin niin lyhytaikaista, että näillä pitoisuuksilla on hyvin vähän merkitystä. Mittauksen aikana mikrossa oli noin litra vettä, jonka kiehuminen piti kuormituksen vakiona. Näennäistehoa mikro otti noin 1050 VA.

Jääkaapissa ei tietävästi ole mitään tehoelektroniikkaa ja kompressorin käyntiä ohjataan releellä. Sen yliaaltotilanne onkin varsin hyvä:



Kuva 48. Virtaspektri. Jääkaappi, energialuokka A+.

Kuten oletettua, ei jääkaapin virrassa paljoa yliaaltoja ollut. Kompressorin pyörittävän moottorin tyypistä ei ole tietoa. Katsotaan vielä miltä näyttää pölynimurin virta:



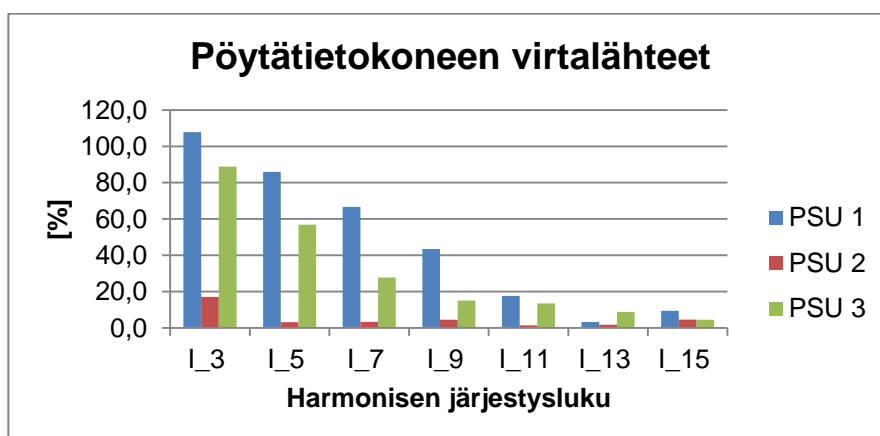
Kuva 49. Virtaspektri, pölynimuri 1 800 W.

Imurin tehonsäätö on elektroninen. Yliaaltopitoisuudet mitattuna pienimmällä ja suurimmalla teholla. Täydellä teholla yliaaltoja syntyy yllättävän vähän. Tämä voisi johtua siitä, että imurissa käytetään säätöön todennäköisesti triakkia. Täydellä teholla ohjauskulma on pieni, joka selittäisi pienet yliaallot.

### 5.3.3 Tietokoneet

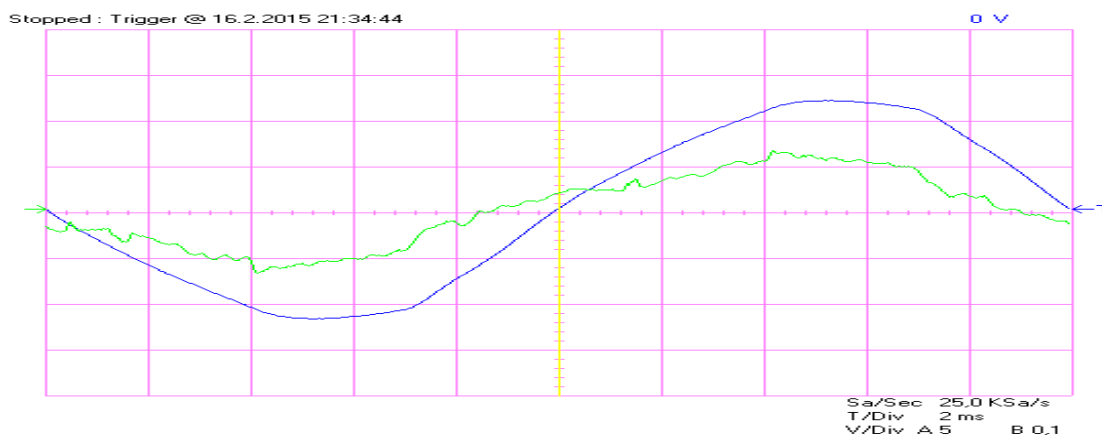
Tietokoneiden virtalähteet voivat olla yksi merkittävä yliaaltolähde. Niissä käytetään samanlaista tasasuuntauskytkentää kuin esimerkiksi edellä käsitellyissä LED-lampuissa, mutta tehot ovat paria kertaluokkaa suurempia. Tietokoneiden tehontarve on kasvanut valtavasti etenkin tehokkaiden näytönohjaimien myötä. Ei ole harvinaista, että pelikäyttöön tehdyn pöytäkoneen tehonkulutus on täydessä rasituksessa 300...400 W. Virtalähteiden nimellistehot voivat olla suurimmillaan 1 kW:n luokkaa.

Tässä työssä tutkittiin kolmea erilaista pöytäkoneen virtalähdettä ja yhtä kannettavan verkkolaitetta. Pöytäkoneen virtalähteet olivat eri aikakausilta, vanhin noin vuodelta 2000. Mittauksen aikana kuormitus pyrittiin pitämään mahdollisimman tasaisena, kaikissa tapauksissa alle puolessa nimellistehosta. Erot yliaaltopitoisuuksissa olivat yllättävän suuret:



Kuva 50. Virtalähteiden yliaaltopitoisuudet.

Virtalähteet on numeroitu ikäjärjestyksessä vanhimmasta uusimpaan. PSU 2 erottuu joukosta todella selvästi. Se oli mittaushetkellä noin 6 vuotta vanha ja päivittäisessä käytössä. Uusin PSU 3 oli noin 2-vuotias. PSU 2:n virran aaltomuotoa tarkastellessa on selvää, että siinä on panostettu yliaaltojen hallintaan:

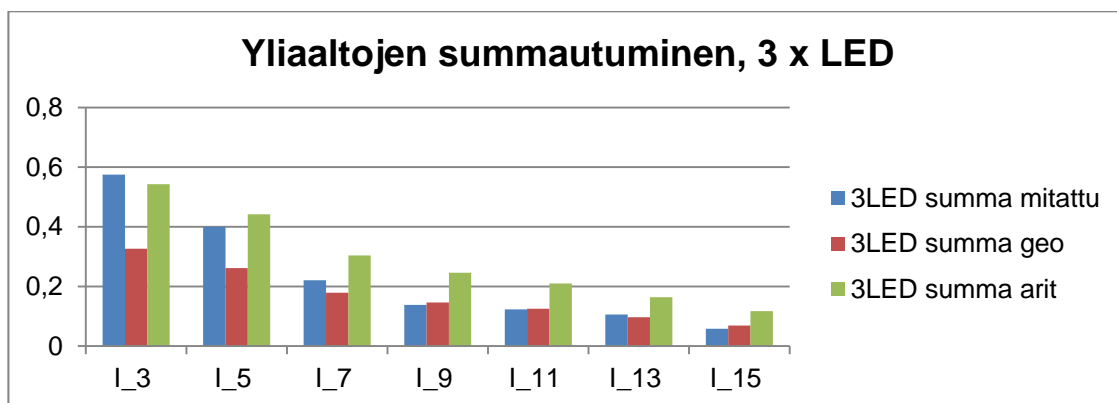


Kuva 51. Pöytätietokoneen virtalähde PSU 2, jännite ja virta.

Kuvan 51 virtalähteessä ottovirran aaltomuotoa muokataan aktiivisesti (*engl. active power factor correction*). Tässä näyttänee onnistuttu melko hyvin. Siitä huolimatta, että kyseessä on hakkuritehonlähde, yliaaltoja se ei tuota juuri enempää kuin perinteinen jääkaappi.

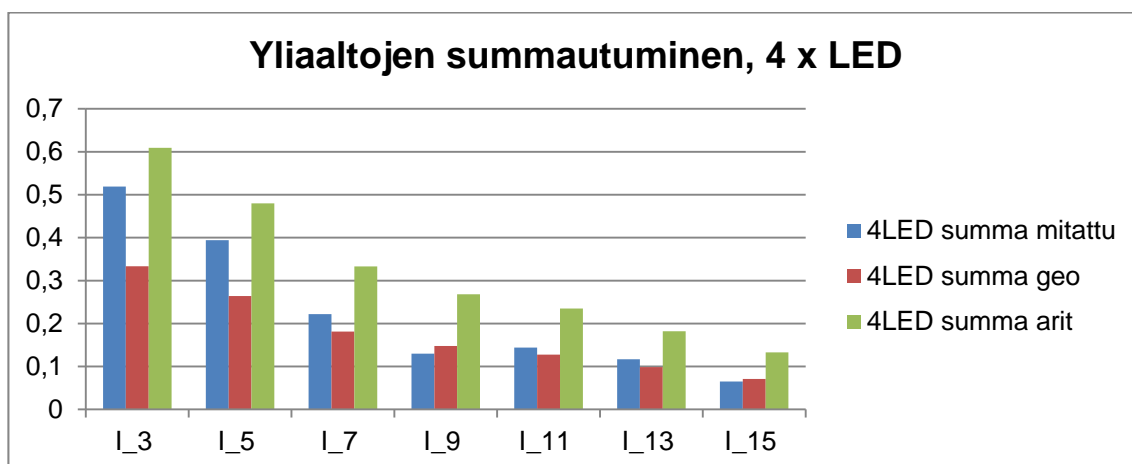
#### 5.4 Yliaaltojen summautuminen

Yksittäisten laitteiden yliaaltopitoisuudet voidaan helposti mitata, kuten edellä on käynyt ilmi. Niiden yhteisvaikutusta suuremmassa mittakaavassa on kuitenkin hankala arvioida etukäteen. Mittausten yhteydessä tehtiin koe, jossa useampi lamppu kytkettiin rinnan ja mitattiin yliaallot tästä yhdistelmästä. Mitattuja arvoja verrataan laskettuihin yliaaltokomponenttien summiin:



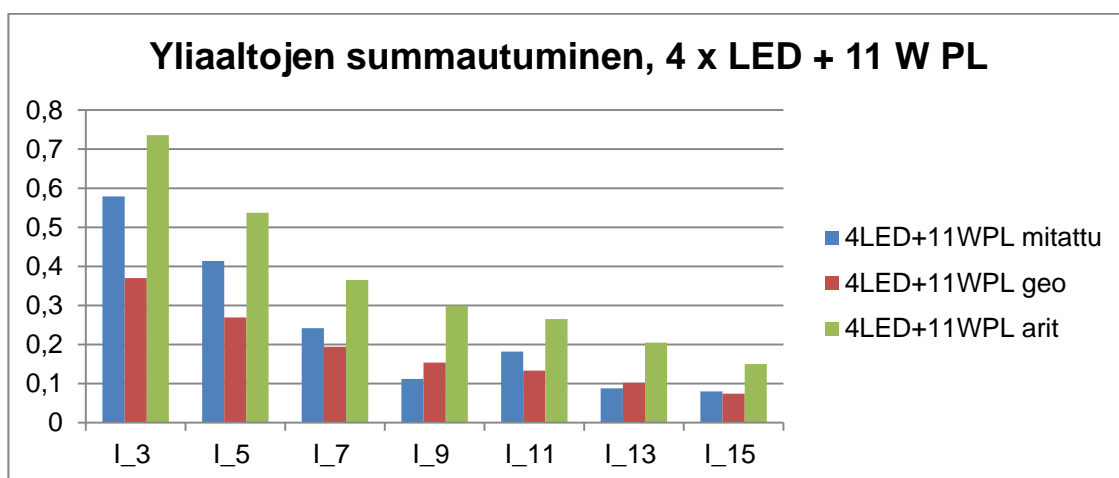
Kuva 52. Kolmen LED-lampun yliaaltojen summat.

Kuvassa 52 (ks. ed. s.) on esitetty kolmen LED-lampun yhteisvaikutus. Mitattujen arvojen lisäksi on laskettu aritmeettinen ja geometrinen summa. Näyttäisi siltä, että järjestyslukuun 5 asti mitatut arvot ovat lähempänä aritmeettista summaa, mutta siitä eteenpäin geometrinen summa on lähempänä totuutta. Etenkin yliaalloilla 9...13 se on todella lähellä mitattua arvoa. Seuraavaksi lisättiin rinnalle neljäs LED-lamppu ja mittaus toistettiin. Tulokset olivat samansuuntaiset:



Kuva 53. Neljän LED-lampun yliaaltojen summat.

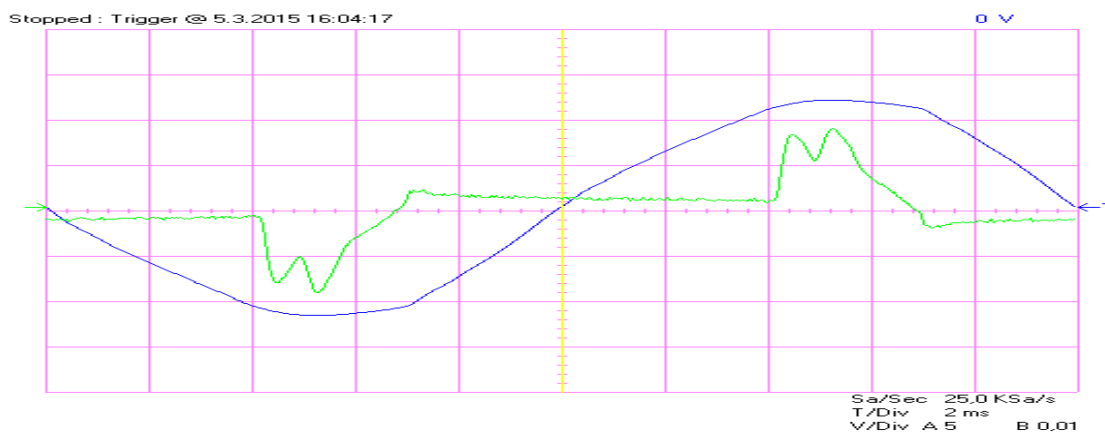
Tuloksista alkaa erottumaan trendi. Lamppujen määrän kasvaessa mitattu arvo lähestyy geometrista summaa ja on yhä kauempana aritmeettisesta summasta. Edelleen pätee se, että järjestyslukuilla  $\leq 5$  aritmeettinen summa on lähempänä. Mittausta jatkettiin ottamalla lisäksi yksi kuristimella varustettu PL-lamppu:



Kuva 54. Neljän LED-lampun ja 11 W PL-lampun yliaaltojen summat.

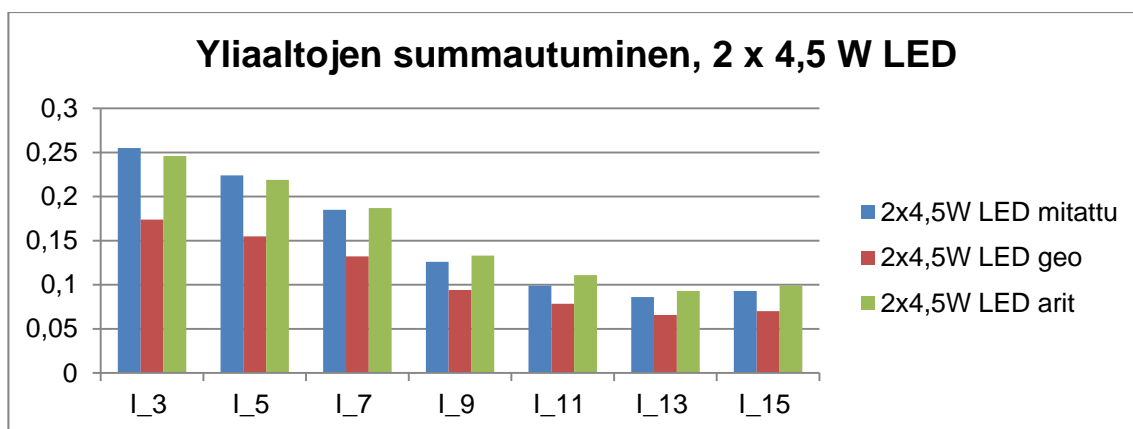
PL-lampun lisääminen ei paljoa vaikuta summiin, kuten kuvasta 54 voitiin huomata (ks. ed. s.). Siinä ei elektroniikkaa ole, joten muut kuin kolmannen yliaallon määrät ovat pieniä. Yliaaltojen 9...13 alueella erot geometriseen summaan suurenevat hieman.

Mittauksissa havaittu yliaaltojen summautuminen ei ole aivan yksinkertaista. Erot laskettujen summien ja mittaustulosten välillä johtunevat erilaisista vaihekulmista. Katsotaan esimerkiksi virran aaltomuotoa, kun kaksi LED-lamppua on rinnan:



Kuva 55. 2 LED-lamppua rinnan, jännite ja virta.

Virrassa näkyy kaksi piikkiä per puolijakso, joiden vaihe-ero on vajaat  $20^\circ$ . Nyt jos ajatellaan, että lisätään laitteita joiden vaihekulmat ovat satunnaiset, virran aaltomuoto alkaa lähestyä jännitteen aaltomuotoa. Yliaaltopitoisuus siis vähenee. Jos taas laitteet ovat identtisiä, voisi arvella vaihekulmien olevan samat. Tämä varmistui, kun mitattiin kahden samanlaisen 4,5 W:n LED-lampun yliaallot:

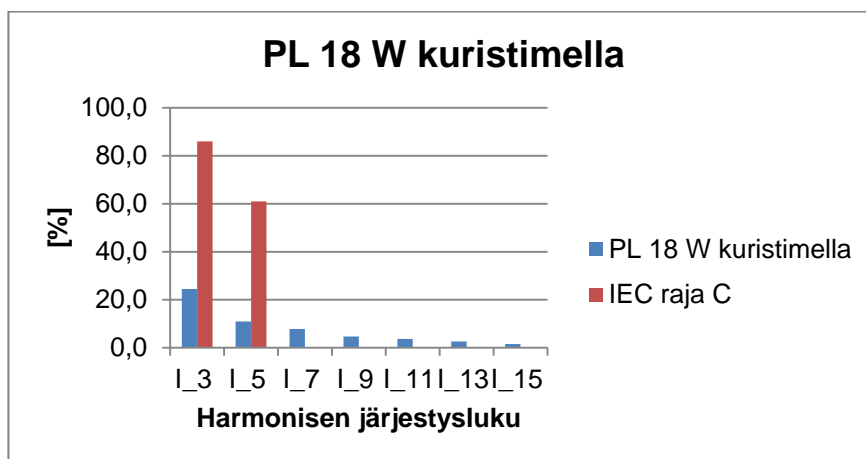


Kuva 56. Kahden samanlaisen LED-lampun yliaaltojen summat.

Kuten kuvasta 56 voitiin havaita (ks. ed. s.), kahden identtisen lampun yliaallot summautuvat aritmeettisesti. Pienet erot mitatuissa ja lasketuissa arvoissa selittyvät mitausepä-tarkkuuksilla ja valmistustoleransseilla.

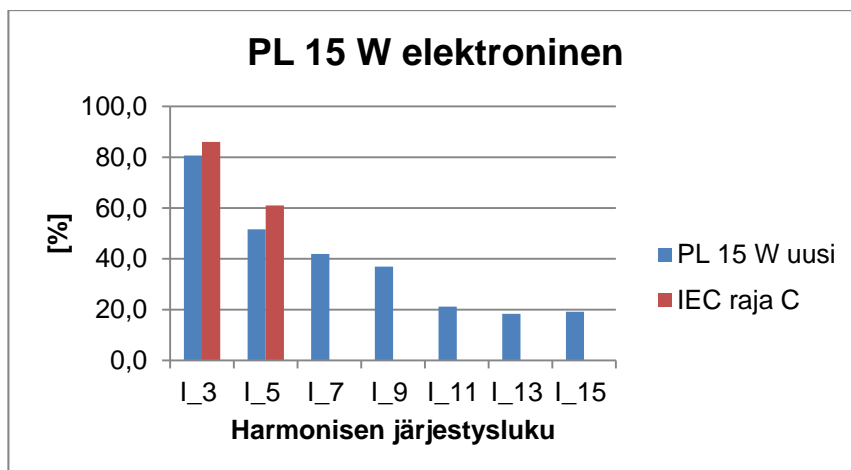
### 5.5 Valonlähteet ja IEC-standardin raja-arvot

Teknisten rajoitteiden takia tässä työssä kyettiin mittaamaan tarkasti ainoastaan yliaaltovirtojen suhteellisia osuuksia. Absoluuttiarvojen mittauksessa virheet kasvavat niin suuriksi, ettei niiden pohjalta tule tehdä arvioita. Valonlähteiden osalta standardi IEC 61000-3-2 antaa yliaaltorajat suhteellisina osuuksina, joten niitä vasten voidaan vertailla tehdä. Tarkastellaan erityyppisten lampujen yliaaltopitoisuuksia suhteessa raja-arvoihin:



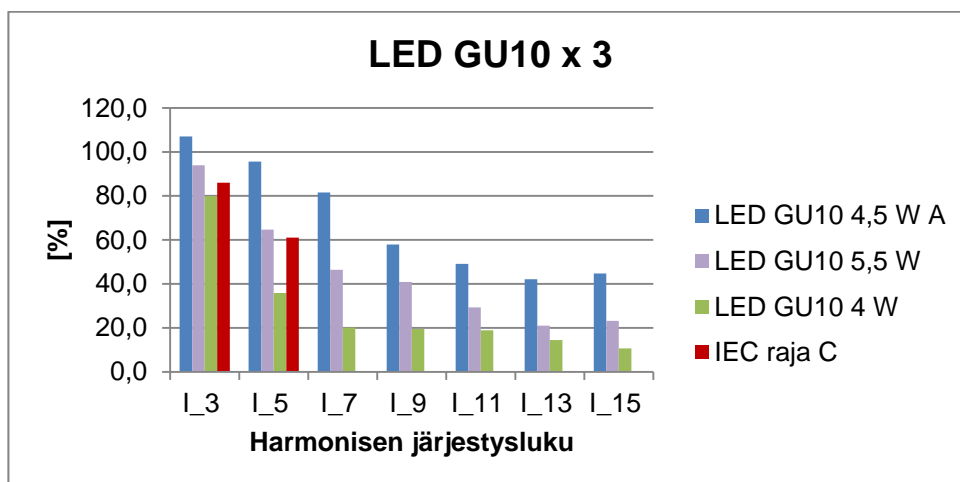
Kuva 57. Kuristimella varustetun PL-lampun yliaallot suhteessa raja-arvoihin.

Standardi määrittelee yliaaltorajat tässä teholuokassa ainoastaan kolmannelle ja viidennelle yliaallolle. Kolmannen raja on 86 % ja viidennen 61 %. Perinteistä tekniikkaa edustava lamppu jää kirkkaasti alle rajojen, kolmatta yliaalto syntyy noin 25 % ja viidettä noin 11 %. Siirrytään seuraavaksi uudempaan tekniikkaan, tarkastellaan uudemman PL-lampun tilannetta:



Kuva 58. Uuden 15 W:n PL-lampun yliaallot suhteessa raja-arvoihin.

Tämä lamppu oli aivan uusi, ostettu maaliskuussa 2015. Nyt rajat ovat selvästi lähempänä, mutta alittuvat silti. Lampun pakkauksessa oli maininta standardin IEC 969:n täyttymisestä, joka koskee juuri loistelamppuja. Vaikka LED-valaistus ei tässä teholuokassa rajojen piiriin kuulukaan, tarkastellaan vielä lopuksi kolmen LED-lampun tilannetta suhteessa rajoihin:



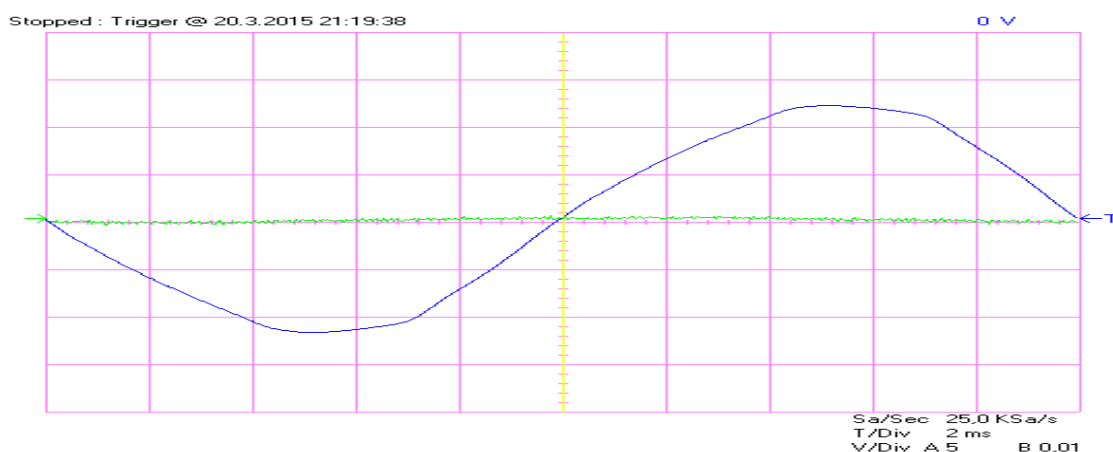
Kuva 59. Kolmen GU10-kantaisen LED-lampun yliaallot suhteessa raja-arvoihin.

Lampuista uusin 4 W:n malli jää alle rajojen, vanhin 4,5 W:n malli ylittää ne selkeästi. Tuloksista voidaan tehdä johtopäätös, ettei nykyaikaisella LED-valaistuksella ole suurempia ongelmia täyttää pienitehoisille valonlähteille asetettuja vaatimuksia. Näin ollen ei pitäisi olla mahdotonta ottaa myös alle 25 W:n LED-lamput yliaaltorajojen piiriin.



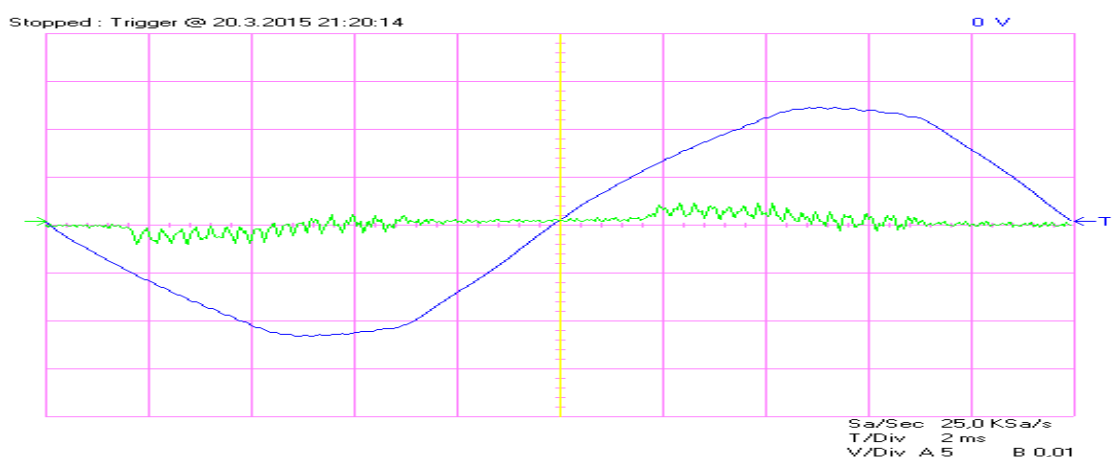
## 5.6 Havaintoja mittauksista ja mahdollisia virhelähteitä

Mittauksia tehdessä tuli selväksi, miten tärkeää mittausolosuhteiden vakiointi on. Mittaustuloksiin voi vaikuttaa moni seikka, joita ei tulisi edes ajatelleeksi. Hyvänä esimerkkinä tästä kannettavan tietokoneen verkkolaite, jonka ottovirta on voimakkaasti säröytynyt. Kesken mittauksen, kytkettäessä tietokone lataukseen, havaittiin mielenkiintoinen ilmiö. Mittalaite oli kytkettynä verkkoon, mutta ilman kuormaa, eli virta nolla. Virran aaltomuoto näytti ennen verkkolaitteen kytkemistä seuraavalta:



Kuva 60. Virtamuuntaja tyhjäkäynnillä.

Tyhjäkäynnillä virta on hyvin lähellä nollaa, kuten olettaa saattaa. Tilanne muuttuu, kun kytketään verkkolaite kiinni kannettavaan tietokoneeseen:



Kuva 61. Virtamuuntaja tyhjäkäynnillä, särövirran aiheuttama häiriö.

Kuten kuvasta 61 (ks. ed. s.) voitiin nähdä, virtamuuntajan toisiossa kulkee virtaa, vaikka ensiö on auki. Häiriön aiheuttajasta ei ole varmuutta, mutta oletettavasti syy on verkkojännitteen aaltomuodon säröytyminen verkkolaitteen ottovirran vaikutuksesta. Tämä jännitesärö aiheuttaisi virran mittalaitteen reaktansseissa. Toinen mahdollinen syy voisi olla jännitemuuntajan hajavuo, joka pääsee vaikuttamaan virtamuuntajaan sen läheisen sijainnin vuoksi. Syntynyt häiriövirta on mitättömän pieni, mutta hyvä esimerkki siitä, millaisia häiriöitä mittaustilanteessa saattaa esiintyä.

Tarkkojen mittausten teko vaatii tarkasti vakioituneet olosuhteet, tarkasti kalibroidut mittalaitteet ja tarkan, mieluusti automatisoidun näytteenoton. Tässä työssä tehdyt mittaukset ja havainnot on otettava suuntaa-antavina, eikä niistä pidä tehdä yleispäteviä johtopäätöksiä. Kaikki mittaustulokset pätevät vain ja ainoastaan mitattujen laitteiden välisessä vertailussa ja siinä tarkkuudessa, mikä voidaan ilman laboratorio-olosuhteita saavuttaa.

## 6 Yhteenveto

Tässä insinöörityössä perehdyttiin yliaaltojen syntyyn, niistä aiheutuviin haittoihin sekä menetelmiin niiden ehkäisemiseksi. Työssä tutkittiin myös erilaisten kodin laitteiden yliaaltopitoisuuksia ja virran aaltomuotoa tarkoitusta varten rakennetulla mittalaitteella. Yliaaltojen syntyä pystyttiin helposti havainnollistamaan simuloimalla tyypillisiä kytkentöjä piirianalyysiohjelmalla. Mittaustulokset olivat suurelta osin yhteneviä simuloitujen tilanteiden kanssa, joten voidaan todeta simuloinnin olevan käyttökelpoinen apuväline yliaaltopitoisuuksia arvioitaessa.

Laitteiden yliaaltopitoisuuksien mittaus osoittautui helpoksi toteuttaa. Mittalaite on rakenteeltaan yksinkertainen ja melko kompakti, eikä sellaisen rakentaminen vaadi suurta rahallista panostusta. Mittauksissa käytetty USB-liitäntäinen oskilloskooppi asetti tiettyjä rajoitteita mittaustarkkuudelle FFT-muunnoksen osalta. Tämä aiheutti sen, ettei virran absoluuttiarvoja saatu mitattua riittävällä tarkkuudella. Suhteellisten arvojen osalta mittaustulokset ovat käyttökelpoisia. Mittalaitteelle löytyy epäilemättä käyttöä myös tulevaisuudessa, jos vastaan tulee esimerkiksi uudentyyppisiä laitteita.

Mittaustuloksia tarkasteltaessa koettiin positiivisia ja negatiivisia yllätyksiä. Puolijohteita sisältävien laitteiden taipumus synnyttää yliaaltoja oli ennakoitavissa, mutta pitoisuuksien

sisä oli merkittäviäkin eroja saman laiteryhmän sisällä. Oli myös laitteita, joiden pitoisuudet jäivät yllättävän alhaisiksi. Etenkin tietokoneiden virtalähteiden osalta oli havaittavissa tekniikan kehitys ja se, että yliaaltopitoisuuksien vähentäminen onnistuu, jos niin halutaan. Etukäteen oletus oli, että pöytätietokoneet olisivat merkittävä yliaaltolähde. Mittausten perusteella näin ei kuitenkaan välttämättä ole, jos käytetään hyvälaatuisia virtalähteitä.

Eniten mielenkiintoa herätti mittauksissa esille tullut yliaaltojen summautuminen. Arvioitaessa yliaaltojen vaikutuksia suuremmassa mittakaavassa pitäisi tietää tarkkaan, mitä laitteita verkkoon on kytketty ja kuinka monta. Jokaisen laitteen ottaman virran aaltomuoto pitäisi myös tietää tarkkaan. Tämä on yleisesti ottaen mahdotonta, joten joudutaan tyytymään laskettuun arvioon. Tämän arvion tarkkuus riippuu suuresti laitteiden määrästä ja paranee laitemäärän kasvaessa.

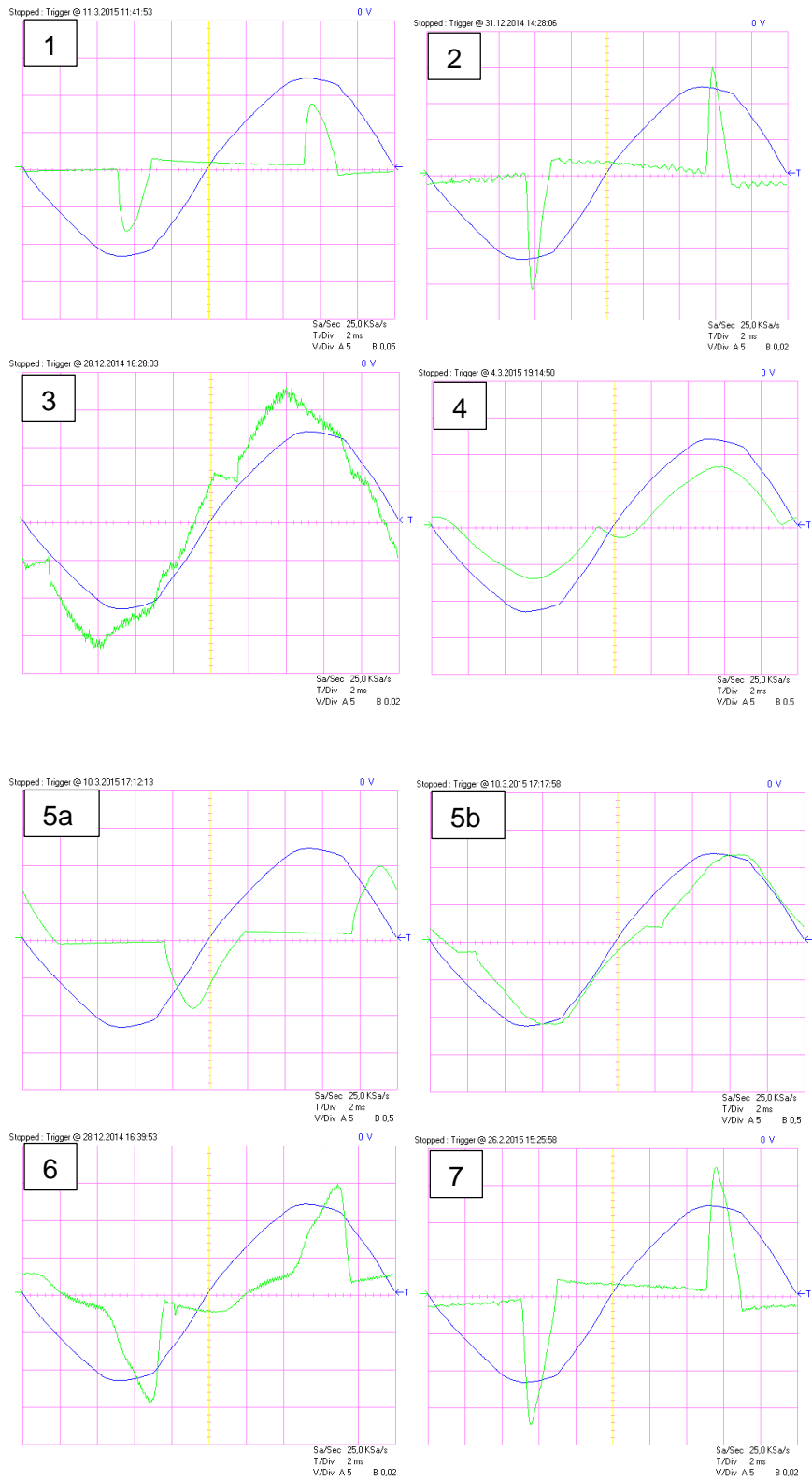
Tämän työn aikana tuli esille monia oppimisen kannalta hyödyllisiä näkökohtia niin teorian kuin käytännönkin tasolla. Piirianalyysiohjelman käyttöön tullutta rutiinia voidaan pitää yhtenä merkittävänä seikkana, josta on varmasti hyötyä myös tulevaisuudessa. Mittaustulokset toimivat hyvänä referenssinä, jos myöhemmin tulee tarvetta tutkia muita vastaavia laitteita. Kokonaisuudessaan työn annin voisi tiivistää lyhyesti: taajuustasossa ajattelu on avain monen asian ja ilmiön ymmärtämiseen.

## Lähteet

- 1 Vishay Intertechnology. Tasasuuntaussilta, datalehti. Verkkodokumentti. <<http://www.vishay.com/docs/88888/3kbp08m.pdf>>. Luettu 10.2.2015.
- 2 Silvonen, Kimmo. 2007. Sähkötekniikka ja elektroniikka. Helsinki: Otatieto.
- 3 ABB Oy. 2013. Technical guide No. 6. Verkkodokumentti. <[http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/cedba3af94239d90c1257b0f004712c4/\\$file/ABB\\_Technical\\_guide\\_No\\_6\\_REVD.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/cedba3af94239d90c1257b0f004712c4/$file/ABB_Technical_guide_No_6_REVD.pdf)>. Luettu 16.2.2015.
- 4 Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2012. Pienjännitestandardi SFS 6000-5-52:2012.
- 5 Korpinen Leena, Mikkola Marko, Keikko Tommi, Falck Emil. Yliaalto-opus. Verkkodokumentti. <<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>>. Luettu 13.2.2015.
- 6 Krishna Vasudevan, Sridhara Rao, Sasidhara Rao. Electrical Machines I, 12 Harmonics. Verkkodokumentti. <[http://nptel.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Electrical\\_Machines\\_I/pdfs/1\\_12.pdf](http://nptel.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Electrical_Machines_I/pdfs/1_12.pdf)>. Luettu 16.2.2015.
- 7 ABB Oy. 1999. Kolmannen yliaallon opas. Verkkodokumentti. <[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/\\$File/THFOP-FI.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/$File/THFOP-FI.pdf)>. Luettu 16.2.2015.
- 8 Tampereen Sähköverkko Oy. 2012. Loistehon hinnoittelu ja kompensointi. Verkkodokumentti. <[https://www.tampereensahkolaitos.fi/sahkoverkkopalvelut/sahkoverkkoonliittymien/TSV-urakoitsijalle/Documents/Loistehon%20hinnoittelu-%20ja%20kompensointiohje%20TSV\\_01-12-2012\\_internet.pdf](https://www.tampereensahkolaitos.fi/sahkoverkkopalvelut/sahkoverkkoonliittymien/TSV-urakoitsijalle/Documents/Loistehon%20hinnoittelu-%20ja%20kompensointiohje%20TSV_01-12-2012_internet.pdf)>. Luettu 18.2.2015.
- 9 Tampereen teknillinen yliopisto. 2013. Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välinen yhteensopivuus - Vaihe 2. Verkkodokumentti. <[http://energia.fi/sites/default/files/energiansaastolamppujen\\_verkostovaikutukset\\_loppuraportti\\_2013-05-22.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/energiansaastolamppujen_verkostovaikutukset_loppuraportti_2013-05-22.pdf)>. Luettu 17.2.2015.
- 10 Vantaan Energia Sähköverkot Oy. Loistehon kompensointi. Verkkodokumentti. <[http://www.vantaanenergia.fi/fi/Sahkoverkko/liittymänrakentaminen/Documents/Loistehon%20kompensointi%20\\_2\\_\\_1.pdf](http://www.vantaanenergia.fi/fi/Sahkoverkko/liittymänrakentaminen/Documents/Loistehon%20kompensointi%20_2__1.pdf)>. Luettu 6.3.2015.

- 11 Schaffner Group. 2014. ECOsine Active. Verkkodokumentti.  
<<http://schaffner.com/en/downloads/file-download/file/ecosineR-active.html>>. Luettu 9.3.2015.
- 12 Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2010. Standardi SFS-EN 50160:2010.
- 13 Fingrid Oyj. 2013. Sähköjärjestelmän vakavien häiriöiden selvittämisen yleisohje. Verkkodokumentti.  
<[http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelmaliitteet/Voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4n%20hallinta/hairioiden\\_selvittamisohje.pdf](http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelmaliitteet/Voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4n%20hallinta/hairioiden_selvittamisohje.pdf)>. Luettu 9.3.2015.
- 14 IEEE Standards Association. 2014. Standardi IEEE 519:2014.
- 15 International Electrotechnical Commission. 2014. Standardi IEC 61000-3-2 Ed 4.0:2014.

## Ottovirran aaltomuotoja



**Selitteet:**

- 1) Tietokoneen LCD-monitori 22".
- 2) Kannettavan tietokoneen virtalähde.
- 3) LCD-televisio 32".
- 4) Mikroaaltouuni.
- 5a) Pölynimuri, pienin teho.
- 5b) Pölynimuri, suurin teho.
- 6) Kotiteatterivahvistin, 7.1 ch.
- 7) Pöytätuuletin, täysi teho.

## IEC 61000-3-2:2014 Harmonisten virtojen raja-arvoja

Laiteluokka A	Suurin sallittu virta [A]	
	Parittomat n	
	3	2,30
	5	1,14
	7	0,77
	9	0,40
	11	0,33
	13	0,21
	15...39	0,15*(15/n)
	Parilliset n	
2	1,08	
4	0,43	
6	0,30	
8...40	0,23*(8/n)	
Laiteluokka B	Suurin sallittu virta [A]	
	Parittomat n	
	3	3,45
	5	1,71
	7	1,155
	9	0,60
	11	0,495
	13	0,315
	15...39	0,225*(15/n)
	Parilliset n	
2	1,62	
4	0,645	
6	0,45	
8...40	0,345*(8/n)	
Laiteluokka D	Harmoninen virta [mA/W]	Suurin sallittu virta [A]
	Parittomat n	
	3	2,3
	5	1,14
	7	0,77
	9	0,4
	11	0,33
	13...39	0,15*(15/n)